Piccoli uomini

Lo straordinario ritrovamento di una specie di minuscoli ominidi vissuti fino a 13.000 anni fa rivoluziona l'albero genealogico dell'umanità moderna

di Kate Wong

Sull'isola di Flores, in Indonesia, si racconta da tempo la storia di un essere minuscolo, che cammina eretto ma con un'andatura un po' sbilenca, ha un appetito vorace e una voce lieve e mormorante. Gli abitanti di Flores lo chiamano *ebu gogo*, «la nonna che mangia ogni cosa», e fino a poco tempo fa l'ipotesi più accreditata era che la leggenda fosse stata ispirata dai macachi. Ma lo scorso ottobre è venuta alla luce un'alternativa affascinante. Un gruppo di ricercatori australiani e indonesiani che effettuavano scavi in una grotta dell'isola hanno scoperto i resti di un minuscolo essere umano – arrivava a malapena a un metro di statura – i cui simili vissero fino a 13.000 anni fa. L'annuncio ha elettrizzato la comunità dei paleoantropologi. Si è sempre ritenuto che negli ultimi 25.000 anni, dopo la scomparsa dell'uomo di Neandertal in Europa e di *Homo erectus* in Asia, *Homo sapiens* abbia avuto la Terra tutta per sé, libero dalla compagnia di altri membri della stirpe umana. Inoltre, ominidi di taglia così piccola finora erano rappresentati solo dai fossili di australopiteci (Lucy e i suoi simili), vissuti quasi tre milioni di anni fa. Nessuno prevedeva che la nostra specie avesse un contemporaneo di una forma così piccola e di aspetto così primitivo come il fossile di Flores. Né sarebbe stato possibile immaginare che un essere con il cranio grande come un pompelmo potesse avere capacità cognitive confrontabili a quelle degli umani anatomicamente moderni. Non è la prima volta che Flores ci sorprende. Nel 1998, un gruppo di archeologi diretto da Michael J. Morwood della University of New England di Armidale, in Australia, ha scoperto nel bacino di Soa, nella parte centrale dell'isola, rudimentali manufatti in pietra risalenti a circa 840.000 anni fa.

Insieme agli strumenti non sono stati rinvenuti fossili umani, ma si è pensato che *H. erectus*, l'unico ominide di cui era nota la presenza a quell'epoca nel Sudest asiatico, avesse attraversato il profondo braccio di mare che separa Flores da Giava. Per i ricercatori, la scoperta che *H. erectus* fosse un navigatore è stata sorprendente, perché la cultura materiale associata fino a quel momento con questa specie non era tale da far pensare che fosse in grado di costruire imbarcazioni. In realtà, le più antiche datazioni accettate fissano le prime costruzioni di barche intorno a 60.000-40.000 anni fa, quando esseri umani di tipo moderno colonizzarono l'Australia. Gli animali preistorici di Flores probabilmente giunsero sull'isola a nuoto, o andando alla deriva su detriti; ma gli esseri umani non sono nuotatori abbastanza abili e resistenti da sopravvivere a una simile traversata, anche se, secondo alcuni, potrebbero averla compiuta a bordo di zattere naturali.

Sperando di documentare capitoli successivi dell'occupazione umana dell'isola, Morwood e Radien P. Soejono dell'Indonesian Center for Archeaology di Giakarta decisero di concentrare le ricerche su una grande grotta scavata nella roccia calcarea, Liang Bua, situata nella parte occidentale di Flores. Gli archeologi indonesiani avevano scavato saltuariamente nella caverna fin dagli anni settanta, ma l'esplorazione si era limitata agli strati più superficiali. Morwood e Soejono, invece, si sono posti l'obiettivo di raggiungere il substrato roccioso. Gli scavi sono iniziati nel luglio 2001, e presto il gruppo di ricerca ha cominciato a riportare alla luce un gran numero di strumenti litici e ossa di una forma nana di *Stegodon*, un parente estinto dell'elefante. Ma è stato solo verso la fine della terza stagione di scavi che è apparso un fossile di ominide, sotto forma di un dente isolato. Morwood ne portò subito il calco al collega Peter Brown, ad Armidale. «Era chiaro che, pur essendo genericamente di tipo umano, il premolare non apparteneva a un essere umano moderno», ricorda Brown. Una settimana dopo arrivò la notizia che gli indonesiani avevano rinvenuto uno scheletro. I due australiani si imbarcarono sul primo volo per Giakarta.

Per quanto il premolare fosse strano, niente avrebbe potuto prepararli alla vista dello scheletro, che a parte le braccia era quasi completo. L'anatomia del bacino rivelava che l'individuo era bipede e probabilmente di sesso femminile, e l'usura dentaria indicava che era adulto. Ma era alto quanto un bambino di tre anni, e il suo cervello era grande quanto il più piccolo dei cervelli di australopiteci conosciuti. Erano presenti anche altri caratteri primitivi, fra cui il bacino largo e il collo del femore allungato, ma per altri aspetti il fossile appariva familiare. I denti piccoli e il naso sottile, la forma generale della calotta cranica e lo spessore delle ossa del cranio erano altrettanti elementi che facevano pensare a *Homo*.

Brown passò i tre mesi successivi ad analizzare l'enigmatico scheletro, che era stato catalogato LB1, ma che alcuni membri del gruppo avevano affettuosamente soprannominato Hobbit, come i minuscoli protagonisti della trilogia di J.R.R. Tolkien *Il signore degli anelli*. Decidere come classificarlo non era facile. Colpito dai caratteri che LB1 condivideva con gli ominidi arcaici, all'inizio Brown propose che rappresentasse un nuovo genere della stirpe umana. Dopo riflessioni approfondite, però, le somiglianze con *Homo* gli parvero più convincenti. Dato che LB1 risaliva a 18.000 anni fa, si sarebbe potuto ragionevolmente concludere che le ossa appartenessero a un rappresentante di *H. sapiens*, per quanto di ridottissime dimensioni. Ma quando Brown e colleghi considerarono i caratteri morfologici degli individui umani moderni di piccola taglia – da quelli normali come i pigmei a quelli patologici come i soggetti affetti da nanismo ipofisario – LB1 non rientrò in nessuna delle descrizioni. I pigmei hanno un corpo piccolo ma un cervello voluminoso, dovuto a un ritardo della crescita nella pubertà, quando l'encefalo ha già raggiunto le sue dimensioni definitive. D'altra parte, gli individui con malattie che producono piccola statura e cervello ridotto presentano anche tutta una serie di anomalie fisiche caratteristiche, del tutto assenti in LB1, e raramente raggiungono l'età adulta. Viceversa, lo scheletro di Flores mostra tratti arcaici che non sono mai stati documentati in individui di *H. sapiens* affetti da patologie della crescita.

La conclusione dei ricercatori è stata che LB1 assomigliava più di tutto a un *H. erectus* in miniatura. Descrivendo il ritrovamento su «Nature», hanno attribuito sia LB1 sia un dente isolato e un osso del braccio provenienti da depositi più antichi a una nuova specie umana, *Homo floresiensis*, sostenendo inoltre che la nuova specie discendeva da un gruppo di *H. erectus* che, rimasto isolato su Flores, si era evoluto in una specie nana, più o meno come era accaduto a *Stegodon*.

I biologi hanno stabilito da tempo che i mammiferi di taglia relativamente grande, quando si insediano su un'isola piccola, tendono a ridurre progressivamente le proprie dimensioni, probabilmente come risposta adattativa alla limitata disponibilità di cibo. Questo adattamento non è svantaggioso, perché in quegli

NANI E GIGANTI. Sulle isole tendono a evolversi specie anomale: gli animali di taglia superiore a quella di un coniglio riducono le proprie dimensioni, mentre gli animali più piccoli le incrementano. Queste trasformazioni sono interpretate come risposte adattative alla limitata disponibilità di risorse alimentari. *Stegodon*, un proboscidato estinto, colonizzò Flores a più riprese, riducendosi dalle dimensioni di un elefante a quelle di un bufalo indiano. Alcuni tipi di ratti, viceversa, col tempo assunsero la taglia di un coniglio. A quanto pare, anche *H. floresiensis* seguì la «regola delle isole»: si ritiene che sia un discendente nano di *H. erectus*, la cui taglia fisica era di poco inferiore a quella degli esseri umani moderni.

Portia Sloan; pagina precedente: Kazuhiko Sano

CARATTERI COMUNI. Alcuni tratti in comune tra LB1 e il genere *Homo* hanno condotto a classificare l'ominide di Flores tra gli appartenenti al nostro genere, nonostante il minuscolo volume cerebrale. Notando che il fossile assomiglia notevolmente a *H. erectus*, gli scopritori hanno ipotizzato che si tratti di una nuova specie, *Homo floresiensis*, che derivò *da H. erectus* riducendo le proprie dimensioni. *H. floresiensis* differisce da *H. sapiens* per diversi caratteri, tra i quali l'assenza del mento, la faccia relativamente proiettata in avanti, la fronte prominente e la scatola cranica appiattita.

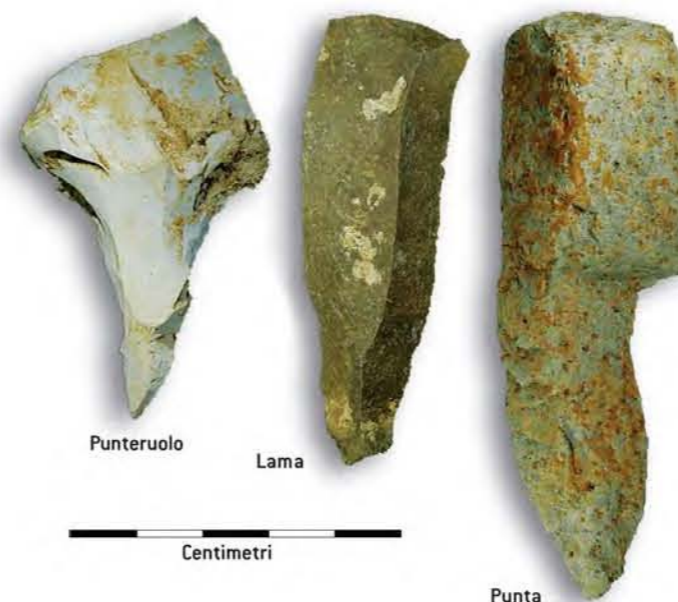
ambienti vivono pochi predatori. Su Flores, gli unici carnivori di dimensioni ragguardevoli erano il varano di Komodo e un'altra specie di varano ancora più grande. Gli animali di piccola taglia, viceversa, tendono a raggiungere dimensioni «colossali», forse perché dal punto di vista energetico un corpo relativamente grande è più efficiente di uno piccolo. A Liang Bua si è trovata testimonianza anche di questo fenomeno, sotto forma di un ratto grosso quanto un coniglio.

Ma attribuire alla cosiddetta «regola delle isole» la taglia minuscola di un ominide non ha precedenti. Secondo la concezione dominante in paleoantropologia, i fattori culturali hanno liberato la specie umana da molte delle pressioni selettive che modificano gli altri esseri viventi: per esempio, ci difendiamo dal freddo accendendo fuochi e coprendoci con abiti anziché evolvere un rivestimento di pelo. La scoperta di una specie ominide nana indica invece che, in condizioni opportune, anche gli esseri umani possono trasformarsi nello stesso, prevedibile modo adottato dagli altri grandi mammiferi quando le condizioni ambientali diventano difficili. Un altro indizio che *Homo* reagisca così alle variazioni della disponibilità di risorse era emerso, sempre nel 2004, con la scoperta di un cranio di *H. erectus* piuttosto minuto a Olorgesailie, in Kenya, osserva Richard Potts della Smithsonian Institution, il cui gruppo ha rinvenuto i fossili. «Ridurre le proprie dimensioni è uno degli "attrezzi" biologici di cui disponeva *H. erectus*», spiega, e l'uomo di Flores sembra un esempio estremo di questo fenomeno.

In sintesi/*Mini umani*

- Secondo le teorie più accreditate, *Homo sapiens* sarebbe stata l'unica specie umana presente sulla Terra negli ultimi 25.000 anni. Ma i fossili scoperti sull'isola indonesiana di Flores mettono in dubbio questa versione.
- Le ossa sono state attribuite a una specie nana di *Homo* vissuta fino a 13.000 anni fa.
- Sebbene l'ominide abbia taglia fisica e volume cerebrale minuscoli, come quelli degli esseri umani più primitivi, sembra aver prodotto strumenti litici perfezionati; se fosse così, sarebbe necessario riconsiderare il rapporto fra dimensioni del cervello e intelligenza.
- La scoperta, tuttavia, ha suscitato un vivace dibattito: alcuni esperti si chiedono se gli scopritori hanno classificato le ossa in maniera corretta e se gli strumenti più perfezionati non possano essere opera di esseri umani di tipo moderno.

Sempre più bizzarro

Se il piccolissimo cervello di *H. floresiensis* è sconcertante, ancora più stupefacente è ciò che riuscì a fare con un organo così modesto. Il cervello voluminoso è un tratto distintivo dell'evoluzione umana. Negli ultimi 6-7 milioni di anni, la capacità cranica dei nostri antenati è aumentata più di tre volte, passando dai 360 centimetri cubi di *Sahelanthropus*,

TECNOLOGIA AVANZATA. Questi sofisticatistrumenti litici sembrano essere opera di *H. floresiensis*. Gli ominidi arcaici con un cervello piccolo come quello di *H. floresiensis* producevano utensili semplici. Ma negli stessi livelli stratigrafici in cui sono stati rinvenuti i resti di Liang Bua è stato scoperto un insieme di strumenti – tra cui punteruoli, lame e punte – la cui complessità era in precedenza ritenuta tipica solo dei manufatti realizzati da *H. sapiens*.

e probabilmente richiedevano l'uso del linguaggio. La scoperta di ossa animali carbonizzate all'interno della grotta, inoltre, induce a pensare che anche la cottura del cibo facesse parte del repertorio culturale di *H. floresiensis*.

Il fatto che un ominide cerebralmente limitato come questo potesse controllare il fuoco lascia stupefatti. Si ritiene che la domesticazione del fuoco sia un'acquisizione relativamente tarda nello sviluppo cognitivo umano: le prime testimonianze certe sono focolari risalenti a 200.000 anni fa scoperti in Europa, opera di neandertaliani dal cervello voluminoso.

Se le interpretazioni degli scopritori dell'uomo di Flores sono corrette, si tratta di uno dei ritrovamenti paleoantropologici più importanti da decenni a questa parte. Non solo indica che un'altra specie umana coesistette con i nostri antenati fino a ieri, in termini geologici, e che il genere a cui apparteniamo è molto più variabile di quanto si prevedesse; essa solleva anche molti interrogativi sul rapporto fra dimensioni cerebrali e intelligenza. Non deve sorprendere, quindi, che l'annuncio sia stato accompagnato da aspre polemiche.

Scontri tassonomici

Le ipotesi alternative sono arrivate molto presto. In una lettera pubblicata il 31 ottobre sull'australiano «Sunday Mail», appena tre giorni dopo l'uscita dell'articolo di «Nature», il paleoantropologo Maciej Henneberg dell'Università di Adelaide ribatteva che una condizione patologica denominata microcefalia potrebbe spiegare i caratteri peculiari di LB1. Gli individui affetti dalla

Forse tre specie umane vissero in stretta prossimità nell'Asia sudorientale per almeno 15.000 anni

considerato da alcuni l'ominide più antico, alla media attuale di 1350. Poiché la documentazione archeologica indica che la complessità dei comportamenti crebbe di pari passo, gli esperti erano piuttosto sicuri che un grande cervello fosse un prerequisito delle pratiche culturali avanzate. E tuttavia, mentre gli australopiteci hanno lasciato solo strumenti litici assai rozzi, *H. floresiensis*, pur essendo altrettanto poco dotato di materia grigia, sembra aver realizzato manufatti il cui livello di perfezionamento è associato altrove soltanto a *H. sapiens*.

Gran parte degli strumenti di Liang Bua è costituita da semplici schegge ricavate da rocce vulcaniche e selce, non più sofisticate degli utensili prodotti dagli australopiteci più recenti e dalle varietà arcaiche di *Homo*. Ma i ricercatori hanno rinvenuto, mescolati alle piccole ossa di *Stegodon*, anche strumenti più raffinati, tra cui punte finemente lavorate, grandi lame, punteruoli, e lame più piccole che probabilmente erano montate su manici e usate come lance. Secondo il gruppo di ricerca, questa associazione indica che l'uomo di Flores dava regolarmente la caccia a *Stegodon*. Molte delle ossa di questa specie appartenevano a individui giovani, che un singolo *H. floresiensis* sarebbe stato in grado di abbattere. Ma alcune erano di animali adulti, che pesavano anche mezza tonnellata: la caccia e il trasporto di prede del genere dovevano essere attività coordinate di gruppo,

forma più grave di microcefalia, il nanismo microcefalico primordiale, muoiono nell'infanzia, ma chi ne è colpito in modo meno grave può arrivare all'età adulta, sia pure con un ritardo mentale. Facendo un confronto statistico fra le dimensioni del cranio e della faccia di LB1 e quelle di un cranio di 4000 anni fa appartenuto a un individuo affetto da microcefalia, Henneberg non rilevava differenze significative. Aggiungendo che l'osso isolato di avambraccio trovato in uno strato più profondo corrisponde a una statura di 151-162 centimetri, quella di molte donne e di alcuni uomini attuali, non certo di un nano: il che fa pensare che a Liang Bua vivessero anche esseri umani di taglia maggiore. Secondo Henneberg, questi elementi dimostrano che LB1 è probabilmente un *H. sapiens* affetto da microcefalia anziché il rappresentante di una nuova forma di *Homo*.

Susan C. Antón della New York University non è d'accordo con questa conclusione. «La morfologia facciale dei microcefalici [moderni] è totalmente diversa», osserva, e la loro taglia corporea non è più piccola del normale. La Antón si chiede piuttosto se LB1 vada davvero assegnato a una nuova specie, affermando che «nella struttura c'è ben poco che lo differenzi da *H. erectus*». Si può anche sostenere che sia una nuova specie, ammette la Antón, ma le differenze esteriori tra LB1 e *Homo erectus* sono meno appariscenti di quelle tra un alano e un chihuahua. A suo parere,

è possibile che il fossile di Liang Bua sia un *H. erectus* affetto da un'anomalia patologica della crescita derivante da microcefalia o carenze nutrizionali.

Secondo alcuni specialisti, però, l'anatomia dell'uomo di Flores presenta una serie di tratti ancora più primitivi. Colin P. Groves della Australian National University e David W. Cameron dell'Università di Sydney fanno notare che il cervello molto piccolo, il collo del femore allungato e altri caratteri rimandano a un antenato del ceppo di *Homo habilis*, il più antico del nostro genere, anziché al più avanzato *H. erectus*. Milford H. Wolpoff dell'Università del Michigan ad Ann Arbor si chiede se il fossile di Flores possa rappresentare addirittura un ramo collaterale di *Australopithecus*. Secondo Wolpoff, se LB1 discende da *H. sapiens* o da *H. erectus*, non si riesce a immaginare in che modo la selezione naturale l'abbia dotato di un cervello ancora più piccolo di quanto previsto per la sua statura. Naturalmente, se LB1 discende da *Australopithecus*, che aveva un apparato masticatorio massiccio, restano da spiegare la sua mandibola relativamente delicata e la dentatura minuta. A parere di Wolpoff, però, questo è un enigma evolutivo meno arduo di quello posto dal minuscolo cervello. Dopo tutto, un cambiamento dell'alimentazione potrebbe spiegare l'apparato masticatorio meno potente, ma perché mai la selezione dovrebbe ridurre l'intelligenza?

Trovare un australopiteco vissuto 18.000 anni fa fuori dall'Africa – addirittura nel Sudest asiatico – sarebbe inaudito. Si ritiene che i membri di questo gruppo si siano estinti in Africa un milione e mezzo di anni fa, senza aver mai lasciato il continente d'origine. Forse, ragionavano gli studiosi, gli ominidi ebbero bisogno di arti lunghi, adatti a un'andatura sostenuta, cervello voluminoso e tecnologia più avanzata prima di potersi avventurare nel resto del Vecchio Mondo. Ma la recente scoperta di fossili di *Homo* risalenti a 1,8 milioni di anni fa a Dmanisi, in Georgia, ha messo in crisi questa ipotesi: gli ominidi georgiani erano piccoli e primitivi, e utilizzavano strumenti non dissimili da quelli che gli australopiteci avevano prodotto un milione di anni prima. Tenendo conto di tutto questo, non vi sono ragioni a priori per cui gli australopiteci (o individui del ceppo di *Homo habilis*, ovviamente) non potrebbero aver colonizzato altri continenti.

Tecnologia inspiegabile

Ma se *Australopithecus* lasciò l'Africa e sopravvisse su Flores fino a tempi molto recenti, perché nella regione non sono mai stati trovati altri resti che confermino questo scenario? Secondo Wolpoff, forse non è così: alcuni fossili indonesiani poco studiati, scoperti negli anni quaranta, sono stati variamente classificati come *Australopithecus*, *Meganthropus* e, molto recentemente, *H. erectus*. Alla luce delle scoperte di Flores, questi fossili meritano di essere riesaminati.

Molti esperti non coinvolti nella scoperta accettano invece la scelta tassonomica di Brown e Morwood. «La maggior parte delle differenze, comprese le apparenti somiglianze con gli australopiteci, è quasi certamente dovuta alla massa corporea molto ridotta», dichiara David R. Begun dell'Università di Toronto. Ovvero, via via che gli uomini di Flores subirono una riduzione di dimensioni a partire da *Homo erectus*, certi loro tratti anatomici si avvicinarono a quelli degli altrettanto piccoli australopiteci. Dato che LB1 ha in comune con *H. erectus* e con altri membri del genere *Homo* alcuni caratteri derivati essenziali, «la scelta più semplice è definirlo una nuova specie di *Homo*», osserva. «È un'interpretazione coerente e ragionevole» conferma un esperto di *H. erectus*, Philip Rightmire della Binghamton University. «In Indonesia deve essersi svolto un esperimento molto interessante...».

Ancora più controversa della posizione dell'«hobbit» nell'albero genealogico umano è l'ipotesi che abbia realizzato strumenti tecnologicamente avanzati. Richard Klein, paleoantropologo della Stanford University, osserva che tra i manufatti scoperti accanto a LB1 nessuno o quasi è del genere più perfezionato trovato altrove nella grotta. Gli strumenti di tipo moderno potrebbero quindi essere dovuti a umani moderni, che avrebbero occupato la caverna in un'altra epoca. Secondo Klein, sono necessari ulteriori scavi per precisare i rapporti stratigrafici fra gli strumenti e i fossili di ominidi. È possibile che vengano alla luce esseri umani di tipo moderno. A questo punto, si tratterebbe di scoprire se nel sito fossero presenti due specie oppure se Liang Bua fosse occupata solo da esseri umani moderni: nel qual caso, LB1 sarebbe semplicemente un individuo di tipo moderno affetto da un'anomalia della crescita.

A parte i problemi stratigrafici, Groves sostiene che gli strumenti sono troppo perfezionati e troppo grandi per essere stati realizzati da un ominide minuscolo e primitivo. Benché i manufatti di Liang Bua siano stati datati fino a 94.000 anni fa – quin-

La casa dell'hobbit

Dieci anni fa, la scoperta che *H. erectus* potrebbe essere sopravvissuto a Giava, in Indonesia, fino a 25.000 anni fa – molto tempo dopo l'arrivo di *H. sapiens* e dopo la scomparsa dei neandertaliani in Europa – sbalordì il mondo scientifico, ma il recente annuncio che un terzo ominide, denominato *H. floresiensis*, visse nella regione fino a soli 13.000 anni fa ha provocato ancora più scompiglio. I suoi resti sono stati rinvenuti in una grande caverna scavata nella roccia calcarea, Liang Bua, nella parte occidentale di Flores. Non si sa esattamente come siano giunti sull'isola: potrebbero aver compiuto la traversata su imbarcazioni o essere arrivati accidentalmente andando alla deriva su zattere naturali. Dal punto di vista geografico, sembra probabile che l'antenata di *H. floresiensis* sia la popolazione di *H. erectus* di Giava. Ma le somiglianze con esemplari rinvenuti in Africa e in Georgia pongono il problema della possibile discendenza di *H. floresiensis* da una migrazione di ominidi in Asia sudorientale diversa da quella che diede origine agli *H. erectus* di Giava. I futuri scavi su Flores e altre isole indonesiane (*nel riquadro a destra*) potranno forse far luce su questi misteri.

La grotta di Liang Bua

Handout/Reuters/Corbis (caverna); Laurie Grace e Edward Bell (mappe)

di troppo antichi per essere opera di *H. sapiens* – Groves fa notare che a Liujiang in Cina sono stati rinvenuti strumenti litici risalenti a 67.000 anni fa, e che potrebbero venire alla luce indizi ancora più antichi della presenza di esseri umani moderni in Estremo Oriente.

«Al momento non vi sono dati a sufficienza» per affermare che *H. floresiensis* abbia realizzato gli strumenti di tipo avanzato, concorda Bernard Wood della George Washington University. Il quale aggiunge però che, supponendo in linea puramente teorica che sia così, «ammetto di non capire più nulla del rapporto tra volume cerebrale e abilità cognitive». Se un ominide cerebralmente non più dotato di uno scimpanzé è stato in grado di creare una cultura materiale come questa, «perché c'è voluto tanto tempo prima che gli esseri umani fossero in grado di realizzare strumenti?».

«Se *Homo floresiensis* era capace di produrre strumenti sofisticati, dobbiamo ammettere che il volume cerebrale non è poi così importante», conclude Rightmire. Negli esseri umani attuali si registra una considerevole variabilità nel volume della materia grigia, e a entrambe le estremità dello spettro si annoverano grandi pensatori. Il Nobel per la letteratura Anatole France aveva una capacità cranica di appena 1000 centimetri cubi; quella del leader puritano Oliver Cromwell superava i 2000. «Questo potrebbe significare che, una volta che il cervello ha raggiunto una certa dimensione, non è più il volume che conta, ma l'organizzazione cerebrale» afferma Potts. A un certo punto, aggiunge, «le connessioni cerebrali possono consentire un buon livello di competenza anche se il cervello sembra piccolo».

Il cervello di LB1 è scomparso da tempo, e quindi la sua organizzazione interna resta un mistero. Qualche indizio potrebbe però essere rinvenuto esaminando l'interno della scatola cranica. A volte i paleontologi riescono a ottenere modelli in lattice dell'interno di crani fossili, con i quali realizzano poi calchi in gesso che rivelano la morfologia dell'organo. Dato che le ossa di LB1 sono troppo fragili per essere sottoposte ai normali procedimenti per la realizzazione di un calco, Brown sta lavorando per realizzarne uno virtuale, basato su scansioni tomografiche del cranio, a partire dal quale potrà poi ottenere un calco reale usando tecniche stereolitografiche.

«Se si rivelasse una versione in miniatura di un cervello umano adulto, sarei davvero molto sorpresa, dichiara la paleoneurologa Dean Falk dell'Università della Florida. E che dire se invece le circonvoluzioni assomigliassero a quelle di uno scimpanzé? Gli specialisti si chiedono da tempo se un cervello grande abbia una morfologia superficiale diversa semplicemente a causa delle sue dimensioni, oppure se la riorganizzazione rispecchia una selezione verso un aumento delle capacità cognitive. «È possibile che questo esemplare riesca a darci una risposta», osserva la Falk.

Quando vissero

Aggiungendo un nuovo ramo al nostro albero genealogico, Peter Brown e colleghi hanno classificato i resti di ominidi rinvenuti a Flores come una nuova specie, *Homo floresiensis*. Il numero di forme di ominidi viventi all'epoca dei primi *H. sapiens* sale così a quattro, se si considerano i neandertaliani come una specie distinta, come appare in questa illustrazione. Brown ritiene che *H. floresiensis* fosse un discendente di *H. erectus* (*nel riquadro*). Altri ipotizzano che si tratti di un individuo patologico appartenente a *H. sapiens* o *H. erectus*, oppure che discendesse da forme più antiche e primitive affini a *H. habilis* o agli australopiteci.

Ritorno al mondo perduto

Dopo aver inviato il loro articolo a «Nature», i ricercatori hanno riferito la scoperta dei resti di altri cinque o sei individui, che rientrano tutti nel profilo di *Homo floresiensis*. Nessuno di essi è completo come LB1, le cui braccia sono tornate alla luce nell'ultima stagione di scavo, ma è stata rinvenuta una seconda mandibola, che a detta degli scopritori è identica per forma e dimensione a quella di LB1. Il fatto che esistano più esemplari di alcune ossa potrà dare un sostegno fondamentale all'ipotesi che siamo in presenza di una popolazione di esseri umani minuscoli, anziché alle ossa sparse di una sola persona. In questo caso, cadrebbero anche le obiezioni che LB1 potesse essere un individuo patologico.

Altri elementi potrebbero essere forniti dall'analisi del DNA contenuto in campioni di peli forse appartenenti all'uomo di Flores; anche i denti e le ossa dell'ominide potrebbero contenere DNA non degradato. «Gli ambienti tropicali non sono l'ideale per la conservazione del DNA, e quindi non abbiamo grandi aspettative – osserva Roberts – ma tentar non nuoce».

Il futuro delle ossa (e del loro eventuale DNA), tuttavia, è incerto. Alla fine di novembre, Teuku Jacob dell'Università Gadjah Mada di Yogyakarta, a Giava, che non aveva partecipato alla scoperta né alle analisi, ha fatto trasportare i delicati fossili dal luogo dov'erano conservati al suo laboratorio. Jacob, decano della paleoantropologia indonesiana, è convinto che LB1 fosse un individuo affetto da microcefalia, e ha ordinato il trasferimento dell'ominide e dei nuovi fossili, non ancora descritti, per scopi di studio e di salvaguardia, a dispetto delle veementi obiezioni degli altri ricercatori. Jacob ha promesso di restituire le ossa molto presto, ma la sua ben nota propensione a limitare l'accesso di altri scienziati ai fossili ha fatto temere ad alcuni che le ossa non verranno studiate mai più.

I tentativi di risolvere l'enigma di *H. floresiensis*, tuttavia, non si fermeranno. Brown, dal canto suo, è ansioso di scoprire i predecessori di taglia più grande del minuscolo ominide, e fa notare che vi sono tre possibilità: l'antenato potrebbe aver ridotto le proprie dimensioni su Flores (e forse sono opera sua gli strumenti di 840.000 anni fa ritrovati nel Bacino di Soa); potrebbe essersi «rimpicciolito» su un'altra isola e poi aver raggiunto Flores; oppure era già piccolo prima di arrivare nel Sudest asiatico. In effetti, per molti versi, *H. floresiensis* assomiglia più agli esemplari africani di *H. erectus* e agli ominidi georgiani che agli *H. erectus* scoperti a Giava. Ma resta da stabilire se queste somiglianze indicano che l'uomo di Flores ebbe origine da una migrazione di *H. erectus* nel Sudest asiatico più antica di quella da cui derivarono gli *H. erectus* di Giava, oppure se si tratta di una pura coincidenza prodotta dal fenomeno del nanismo insulare. Scavi futuri potrebbero colmare qualche lacuna. Il gruppo di ricerca ha in programma di proseguire le indagini a Flores e a Giava, e il prossimo anno darà inizio a lavori su altre isole indonesiane, tra cui Sulawesi.

Le ossa degli ominidi di Liang Bua si riferiscono a un arco cronologico che va da 95.000 a 13.000 anni fa, e questo ha fatto pensare agli scopritori che i piccoli abitanti di Flores siano periti, insieme con gli *Stegodon* nani, a causa di un'enorme eruzione vulcanica avvenuta 12.000 anni fa. Se *H. erectus* continuò ad abitare la vicina Giava fino a 25.000 anni fa, e *H. sapiens* era già arrivato nella regione 40.000 anni fa, allora tre specie umane vissero a contatto di gomito nel Sudest asiatico per almeno 15.000 anni.

E gli scopritori dell'uomo di Flores prevedono che le sorprese non finiranno qui. Le isole di Lombok e Sumbawa appaiono come naturali tappe intermedie nel trasferimento degli ominidi da Giava o dall'Asia continentale a Flores. Le popolazioni che si insediarono su queste isole potrebbero aver dato inizio a traiettorie evolutive ancora differenti.

Si ipotizza che alcuni di questi rami dell'albero genealogico di *Homo* siano durati fino a epoca storica. E forse vivono ancora nei luoghi più remoti delle foreste pluviali dell'arcipelago della Sonda, attendendo (o evitando) di essere scoperti. A Flores, racconti orali narrano che *ebu gogo* esisteva ancora quando i coloni olandesi si insediarono sull'isola nel XIX secolo. E nel folklore malese compare un altro piccolo essere simile all'uomo, chiamato *orang pendek*, che vivrebbe ancora oggi a Sumatra.

«Sembra che ogni paese abbia le sue leggende su questi esseri», osserva Brown. «Abbiamo scavato un gran numero di siti in tutto il mondo, e non li abbiamo mai trovati. Finché non abbiamo scoperto LB1.» Forse gli scienziati non riusciranno mai ad accertare se le leggende su *ebu gogo* e *orang pendek* tramandino avvistamenti reali di altre specie umane, ma questa nuova possibilità ispirerà senza dubbio le ricerche per molti anni.

PER APPROFONDIRE

BROWN P. e altri, *A New Small-Bodied Hominin from the Late Pleistocene of Flores*, Indonesia, in «Nature», n. 431, pp. 1055-1061, 28 ottobre 2004.

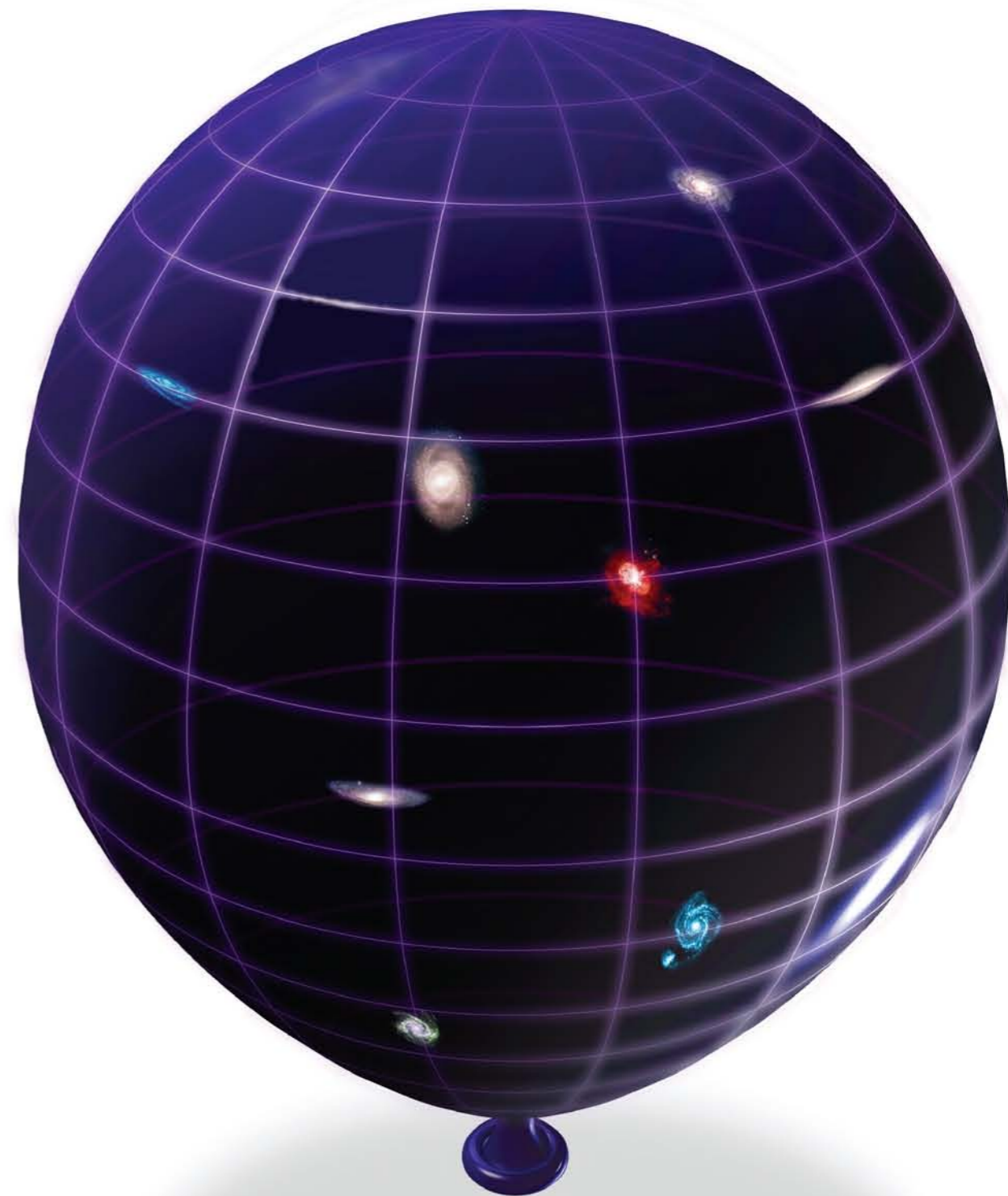
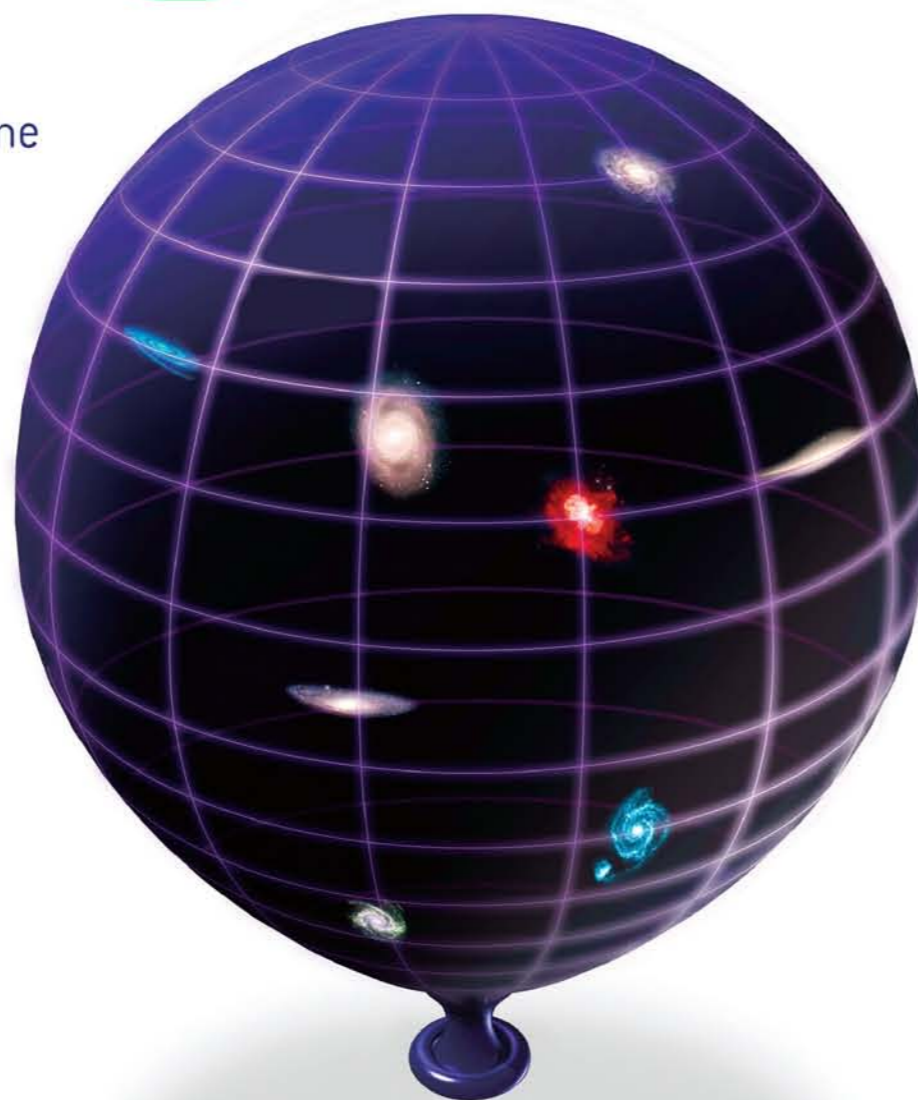
MORWOOD M.J. e altri, *Archaeology and Age of a New Hominin from Flores in Eastern Indonesia*, in «Nature», n. 431, pp. 1087-1091, 28 ottobre 2004.

Un'intervista con Peter Brown è sul sito: www.sciam.com/ontheweb.

Piccoli equivoci sul big bang

Perplessi a proposito dell'espansione dell'universo? Non siete i soli. Anche gli astronomi, a volte, fanno un po' di confusione

di Charles H. Lineweaver e Tamara M. Davis

Slim Films

UN PALLONCINO CHE SI GONFIA è un'analogia vecchia ma efficace per capire l'espansione dell'universo. Le galassie sulla superficie del palloncino sono in quiete, eppure con l'espandersi dell'universo la distanza di una galassia dall'altra aumenta. Le galassie stesse non aumentano di dimensione.

L'espansione dell'universo è probabilmente il fatto più importante che abbiamo scoperto a proposito delle nostre origini. Non stareste leggendo questo giornale se l'universo non si fosse espanso. Gli esseri umani non esisterebbero. Gli oggetti freddi fatti di molecole, come le forme di vita e i pianeti di tipo terrestre, non sarebbero mai comparsi se l'universo, a partire da un big bang ad altissima temperatura, non si fosse espanso e raffreddato. La formazione di tutte le strutture del cosmo, dalle galassie alle stelle, dai pianeti agli articoli di «Le Scienze», è dovuta all'espansione. A luglio saranno passati quarant'anni da quando fu annunciata la scoperta di prove definitive dell'espansione dell'universo a partire da uno stato primordiale più caldo e più denso. Erano stati scoperti gli ultimi freddi bagliori del big bang: la radiazione cosmica di fondo a microonde. Da allora, l'espansione e il raffreddamento dell'universo sono stati il tema unificante della cosmologia, proprio come l'evoluzione darwiniana è il tema unificante della biologia. Analogamente all'evoluzione darwiniana, l'espansione cosmica è il contesto all'interno del quale prendono forma strutture semplici che si sviluppano nel corso del tempo in strutture complesse. Senza l'evoluzione e l'espansione, la biologia e la cosmologia moderne avrebbero poco senso.

L'espansione dell'universo è come l'evoluzione darwiniana anche in un altro senso: la maggior parte degli scienziati pensa di averla capita, ma pochi sono d'accordo sul suo vero significato. Un secolo e mezzo dopo *L'origine delle specie*, i biologi discutono ancora sulle modalità e le implicazioni (ma non sulla realtà) del darwinismo, mentre buona parte del pubblico ancora vaga in un'ignoranza predarwiniana. Allo stesso modo, a 75 anni dalla sua scoperta, l'espansione dell'universo è ancora largamente fraintesa. Un autorevole cosmologo che si occupa dell'interpretazione della radiazione cosmica di fondo a microonde, James Peebles della Princeton University, scrisse nel 1993: «La piena ampiezza e ricchezza del modello del big bang caldo dell'universo in espansione non è compresa come meriterebbe, persino tra coloro che forniscono alcuni dei più stimolanti contributi alla ricerca cosmologica.»

Scienziati famosi, autori di libri di testo di astronomia e noti divulgatori hanno fatto affermazioni scorrette, fuorvianti o facilmente equivocabili sull'espansione dell'universo. Dato che l'espansione è la base del modello del big bang, questi equivoci sono di grande importanza. L'espansione è un'idea affascinante per la sua semplicità, ma che cosa significa esattamente che l'universo si sta espandendo? Dove si espande? Anche la terra si espande? Ad aumentare la confusione, adesso sembra che l'espansione stia accelerando, un processo le cui conseguenze possono veramente cambiare le nostre concezioni.

Ma che cos'è l'espansione?

Quando si espande un oggetto familiare, come una caviglia slogata o l'impero romano o ancora una bomba, esso diventa più grande, allargandosi nello spazio attorno a sé. Le caviglie, gli imperi e le bombe hanno centri e confini. Fuori dai loro confini c'è spazio in cui espandersi. L'universo non sembra avere un confine o un centro o un esterno, perciò come può espandersi?

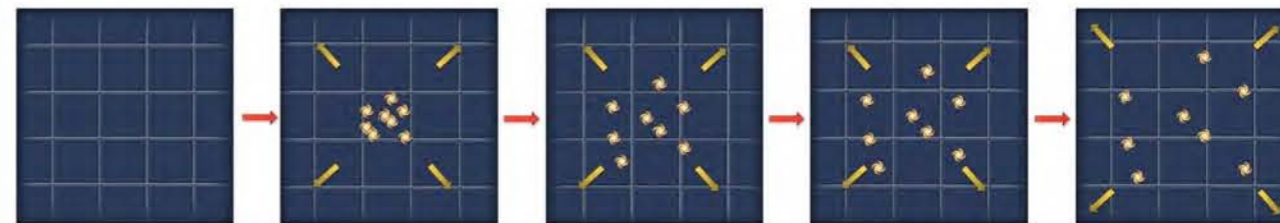
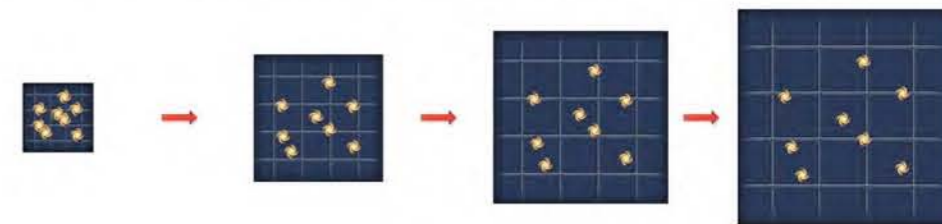
Una buona analogia è questa: immaginiamo di essere una formica che vive sulla superficie di un palloncino che si sta gonfiando. Improvvisamente il nostro mondo è diventato bidimensionale; le sole direzioni che conosciamo sono destra, sinistra, avanti e indietro. Non abbiamo idea di che cosa significhino «su» e «giù». Un bel giorno ci rendiamo conto che la nostra camminata per andare in cerca di afidi è più lunga di un tempo: cinque minuti oggi, sei minuti domani, sette dopodomani. Anche il tempo necessario per raggiungere altri luoghi familiari sta aumentando. Eppure siamo sicuri che non stiamo camminando più lentamente e che gli afidi si aggirano casualmente in gruppo e non si allontanano da noi.

Questo è il fatto importante: le distanze tra noi e gli afidi stanno aumentando anche se gli afidi non si stanno spostando. Stanno lì, immobili rispetto alla gomma del palloncino, eppure la nostra distanza da loro e quella tra ognuno di essi sta aumentando perché il palloncino si sta espandendo. Osservando questi fatti, ne concludiamo che si sta espandendo il terreno sotto i nostri piedi. Strano, perché abbiamo camminato in giro per il nostro mondo senza trovare limiti o un «esterno» in cui possa espandersi.

In sintesi/*Confusione cosmica*

- L'espansione dell'universo è uno dei concetti fondamentali della scienza moderna, ma anche uno di quelli più comunemente fraintesi.
- La chiave per evitare confusioni è di non prendere il termine «big bang» (grande esplosione) troppo letteralmente. Il big bang non fu una bomba che esplose al centro dell'universo e scagliò materia verso l'esterno in un vuoto preesistente. Fu piuttosto un'esplosione dello spazio stesso che avvenne ovunque, analogamente a come l'espansione della superficie di un palloncino avviene ovunque sulla superficie.
- Questa differenza tra espansione *dello* spazio ed espansione *nello* spazio può sembrare sottile, ma ha conseguenze importanti per le dimensioni dell'universo, la velocità a cui le galassie si allontanano le une dalle altre, le osservazioni che possiamo fare e il tipo di accelerazione a cui sembra che l'universo sia sottoposto.
- A rigor di termini, il modello del big bang ha da dire molto poco sul big bang stesso. Descrive ciò che avvenne dopo.

CHE ESPLOSIONE FU IL BIG BANG?

SBAGLIATO: Il big bang fu come una bomba che esplose *nello* spazio, precedentemente vuoto.
Da questo punto di vista, l'universo prese a esistere quando la materia esplose a partire da un punto particolare. La pressione era massima al centro e più bassa nel vuoto circostante, e questa differenza di pressione spinse il materiale verso l'esterno.

GIUSTO: Fu un'esplosione *dello* spazio, che portò con sé la materia.
Lo spazio e il tempo in cui risiediamo apparvero col big bang e iniziarono a espandersi. Nessun luogo specifico ne fu il centro. La pressione era identica dappertutto: non c'era alcuna differenza in questo parametro che potesse dar luogo a un'esplosione convenzionale.

Alfred T. Kamajian

L'espansione del nostro universo è molto simile a quella del palloncino. Le distanze tra noi e le galassie lontane stanno aumentando. Gli astronomi dicono, semplificando, che le galassie distanti «recedono», ma di fatto le galassie non stanno viaggiando nello spazio allontanandosi da noi. Non sono schegge di un'enorme bomba. In realtà è lo spazio tra noi e le galassie che si sta espandendo. Le singole galassie si muovono a caso all'interno degli ammassi, ma gli ammassi di galassie sono essenzialmente in quiete. Il termine «in quiete» può essere definito rigorosamente. La radiazione di fondo a microonde riempie l'universo e definisce un sistema di riferimento universale, analogo alla gomma del palloncino, rispetto al quale si può misurare il moto di una galassia.

Questa analogia con il palloncino non deve essere portata troppo oltre. Dal nostro punto di vista esterno al palloncino l'espansione della gomma curva bidimensionale è possibile solo perché la gomma è immersa nello spazio tridimensionale. Nel contesto delle tre dimensioni il palloncino ha un centro, e la sua superficie si espande nell'aria circostante via via che viene gonfiato. Se ne potrebbe concludere che l'espansione del nostro spazio tridimensionale richiede la presenza di una quarta dimensione. Ma nella teoria della relatività generale di Einstein, il fondamento della cosmologia moderna, lo spazio è dinamico. Può espandersi, contrarsi e curvarsi senza essere immerso in uno spazio di dimensione maggiore.

Da questo punto di vista, l'universo è autocontenuto. Non ha bisogno né di un centro da cui espandersi né di un esterno (dovunque esso si trovi) con uno spazio vuoto in cui espandersi. Quando si espande, non si appropria di uno spazio circostante precedentemente non occupato. Alcune teorie cosmologiche, come la teoria delle stringhe, postulano l'esistenza di dimensioni ulteriori, ma l'espansione del nostro universo tridimensionale non ha bisogno di questa ipotesi.

L'inevitabile ingorgo

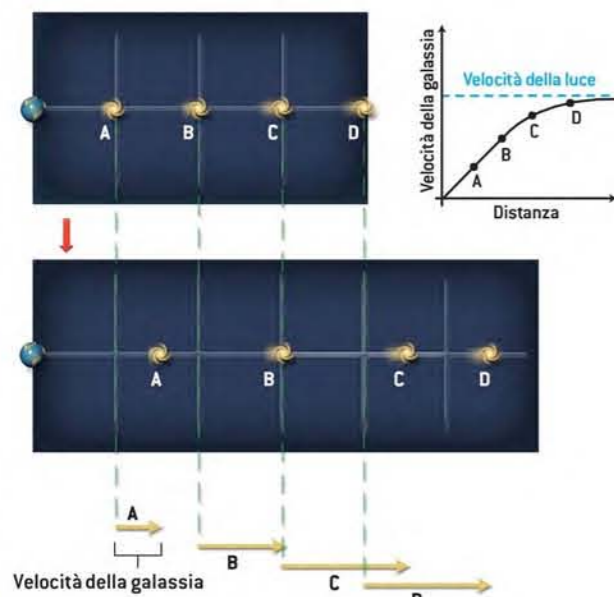
Nel nostro universo, come sulla superficie del palloncino, ogni cosa si allontana da ogni altra. Quindi il big bang non fu un'espansione *nello* spazio; fu piuttosto un'esplosione *dello* spazio. Non avvenne in un luogo particolare per poi estendersi di lì in un immaginario spazio vuoto preesistente. Si verificò dappertutto simultaneamente.

Se si immagina di far tornare indietro nel tempo l'orologio, ogni regione dello spazio nell'universo si contrae, e tutte le galassie che vi sono contenute si avvicinano sempre di più, fino a scontrarsi in una sorta di ingorgo cosmico: il big bang. Questa analogia con un ingorgo stradale fa pensare a un intasamento che si potrebbe evitare, se solo si ascoltassero alla radio le notizie sul traffico. Ma il big bang fu un ingorgo inevitabile. Fu come se la superficie della terra e tutte le sue strade si contraessero lasciando invece restare le automobili delle loro dimensioni. Prima o poi, in ogni strada le macchine sarebbero stipate, paraurti contro paraurti. Nessun notiziario radiofonico potrebbe evitare un simile ingorgo. L'intasamento sarebbe ovunque.

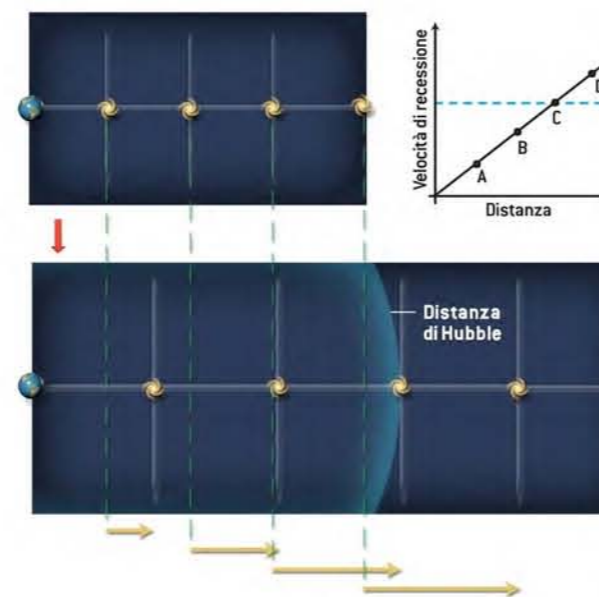
Analogamente, il big bang avvenne dappertutto: nella stanza in cui state leggendo questo articolo, in un punto appena al-

LE GALASSIE POSSONO RECEDERE A VELOCITÀ MAGGIORE DELLA LUCE?

SBAGLIATO: Certo che no. La teoria della relatività ristretta di Einstein lo vieta.

Consideriamo una regione di spazio che contiene alcune galassie. Via via che si espande, le galassie si allontanano. Più è lontana una galassia, maggiore è la sua velocità di recessione (*frecce in giallo*). Se la velocità della luce è il limite, la velocità di recessione, a un certo punto, non può più aumentare.

GIUSTO: Certo che possono. La relatività ristretta non si applica alla velocità di recessione.

La velocità di recessione aumenta senza limiti con la distanza. Oltre una certa distanza, nota come distanza di Hubble, supera la velocità della luce. Questa non è una violazione della relatività, perché la velocità di recessione non è causata da un moto *nello* spazio, ma dall'espansione *dello* spazio.

Alfred T. Kamajian

la sinistra di Alpha Centauri. Ovunque. Non fu una bomba che esplose in un punto specifico che possiamo identificare come centro dell'esplosione. Così, nell'analogia con il palloncino, non c'è un punto speciale sulla superficie del palloncino che sia il centro dell'espansione.

Questa ubiquità del big bang è valida indipendentemente da quanto grande sia l'universo o addirittura dal suo essere di grandezza finita o infinita. La relatività generale descrive come si dilata ogni regione dello spazio, ma non dice nulla sulle dimensioni o sulla forma complessiva dello spazio. I cosmologi dicono qualche volta che l'universo è stato delle dimensioni di un pompelmo, ma intendono che la parte di universo che possiamo vedere attualmente, l'universo osservabile, è stato delle dimensioni di un pompelmo.

Osservatori che vivessero nella galassia di Andromeda e oltre avrebbero i loro universi osservabili, distinti dal nostro ma che vi si sovrappongono. Gli abitanti di Andromeda possono vedere galassie che noi non possiamo vedere, solo per il fatto di essere un po' più vicini a esse, e viceversa. Anche il loro universo osservabile è stato delle dimensioni di un pompelmo. Quindi possiamo concepire l'universo delle origini come un mucchio di pompelmi che si estende all'infinito in tutte le direzioni. Perciò l'idea che il big bang fosse «piccolo» è fuorviante. È possibile che la totalità dello spazio sia infinita. Per quanto uno spazio infinito si contragga, rimane infinito.

Più veloce della luce

Altri equivoci riguardano la descrizione quantitativa dell'espansione. La velocità a cui aumenta la distanza tra le galassie segue una legge scoperta dall'astronomo statunitense Edwin Hubble nel 1929: la velocità con cui una galassia recede da noi (v) è direttamente proporzionale alla sua distanza (d), cioè $v = Hd$. La costante di proporzionalità H, la «costante di Hubble», quantifica la rapidità con cui lo spazio si sta dilatando, non soltanto attorno a noi ma attorno a qualsiasi osservatore nell'universo.

Alcuni sono perplessi per il fatto che alcune galassie non obbediscono alla legge di Hubble. Andromeda, la grande galassia più vicina a noi, si sta effettivamente muovendo verso di noi. Queste eccezioni si verificano perché la legge di Hubble descrive solo il comportamento medio delle galassie. Le galassie possono avere anche modesti moti locali nel loro girovagare, e attrarsi gravitazionalmente, come stanno facendo la Via Lattea e Andromeda. Anche le galassie lontane hanno piccole velocità locali, ma dal nostro punto di vista (per valori elevati di d) queste velocità casuali sono sovrastate dalla grande velocità di recessione (v). Quindi per quelle galassie la legge di Hubble vale con buona approssimazione.

Secondo la legge di Hubble, l'universo non si espande a una singola velocità. Alcune galassie recedono da noi a 1000 chilometri al secondo, altre (quelle distanti il doppio) a 2000, e così via. In effetti, la legge di Hubble dice che le galassie oltre una certa distanza, nota come distanza di Hubble, recedono a velocità maggiore di quella della luce. Per i valori misurati della costante di Hubble, questa distanza è pari a circa 14 miliardi di anni luce.

Il fatto di affermare che le galassie possono essere più veloci della luce significa che la legge di Hubble è sbagliata? La teoria della relatività ristretta di Einstein non dice forse che nulla può avere una velocità superiore a quella della luce? Questo problema ha lasciato perplesse intere generazioni di studenti. La soluzione è che la relatività ristretta si applica solo a velocità «normali», al movimento nello spazio. La velocità nella legge di Hubble è una velocità di recessione causata dell'espansione dello spazio, non un movimento attraverso lo spazio. È un effetto che riguarda la relatività generale, e non è vincolato dal limite di velocità della velocità ristretta. Avere una velocità di recessione maggiore della velocità della luce non viola la relatività ristretta. È ancora vero che nulla batterà mai in velocità un raggio di luce.

Verso il rosso!

La prima constatazione che l'universo si sta espandendo emerse tra il 1910 e il 1930. Gli atomi emettono e assorbono luce di specifiche lunghezze d'onda, come si può misurare in esperimenti in laboratorio. Le stesse configurazioni appaiono nella luce proveniente dalle galassie lontane, con la differenza che sono spostate verso lunghezze d'onda maggiori. Come dicono gli astronomi, la luce galattica ha subito uno spostamento verso il rosso (*redshift*, in inglese, con un termine che è entrato nel linguaggio astronomico internazionale). La spiegazione è molto semplice: via via che lo spazio si espande, le onde luminose si allungano, e perciò si indeboliscono. Se le dimensioni dell'universo raddoppiano durante il tragitto delle onde, la loro lunghezza d'onda raddoppia e la loro energia si dimezza.

Questo fenomeno può essere descritto in termini di temperatura. I fotoni emessi da un corpo hanno, collettivamente, una certa temperatura: una certa distribuzione di energia che descrive quanto è caldo il corpo. Viaggiando nello spazio in espansione, i fotoni perdono energia e la loro temperatura decresce. In questo modo l'universo si raffredda espandendosi, proprio come l'aria compressa in una bombola da sub si raffredda quando viene fatta uscire permettendole di espandersi. Per esempio, oggi la radiazione di fondo a microonde ha una temperatura di circa tre kelvin, ma il fenomeno che la produsse avvenne a circa 3000 Kelvin. Dal momento dell'emissione di questa radiazione l'universo si è ingrandito di un fattore 1000, perciò la temperatura dei fotoni è diminuita dello stesso fattore. Osservando il gas nelle galassie lontane gli astronomi hanno misurato direttamente la temperatura della radiazione nel lontano passato. Queste misurazioni confermano che l'universo si va raffreddando nel corso del tempo.

C'è un'enorme confusione a proposito della relazione tra spostamento verso il rosso e velocità. Il redshift causato dall'espansione è spesso confuso con il più familiare spostamento verso il rosso generato dall'effetto Doppler. Il comune effetto Doppler fa sì che le onde sonore si allungano se la sorgente del suono si sta allontanando, come succede con la sirena di un'ambulanza. Lo stesso principio descrive anche come le onde luminose si allungano se la sorgente della luce si allontana da noi nello spazio.

Un'ipotesi stancante

Puntuali come un orologio, ogni volta che pubblichiamo un articolo di cosmologia, ci sono lettori che scrivono per sostenere che le galassie non si stanno veramente allontanando da noi e che l'espansione dello spazio è un'illusione. Propongono che gli spostamenti galattici verso il rosso siano causati, in realtà, dal fatto che la luce si «stancherebbe» durante il suo lungo viaggio. Qualche fenomeno ignoto fa sì che la luce perda spontaneamente energia, e così si sposti verso il rosso, mentre si propaga nello spazio.

Questa ipotesi è vecchia di almeno mezzo secolo, e a prima vista sembra plausibile. Il problema è che non concorda con i dati osservati. Per esempio, quando una stella esplode come supernova, diventa splendente e poi si affievolisce; è un processo che dura circa due settimane per il tipo di supernova che gli astronomi usano per studiare lo spazio. Durante queste due settimane, la supernova emette un flusso di fotoni. L'ipotesi della luce stanca prevede che questi fotoni perdano energia mentre si propagano, ma che l'osservatore veda sempre un flusso che dura due settimane.

Nello spazio in espansione, invece, non solo i singoli fotoni si allungano (perdendo così energia) ma anche l'intero flusso di fotoni si allunga. Così ci vogliono più di due settimane perché tutti i fotoni arrivino sulla Terra. Recenti osservazioni confermano questo effetto. Una supernova in una galassia che ha un redshift pari a 0,5 dura apparentemente tre settimane; una supernova in una galassia con redshift pari a 1 dura quattro settimane.

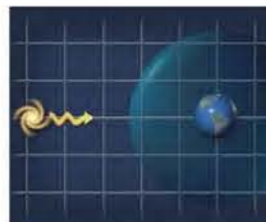
L'ipotesi della luce stanca è in conflitto anche con le osservazioni dello spettro della radiazione cosmica di fondo a microonde e della luminosità superficiale delle galassie distanti. È ora di mettere a letto la luce stanca.

P. Challis/Center for Astrophysics/STScI/NASA

LE SUPERNOVE, come questa nell'ammasso di galassie della Vergine, sono una traccia dell'espansione cosmica. Le loro proprietà osservate escludono teorie cosmologiche alternative in cui lo spazio non si espande.

POSSIAMO VEDERE GALASSIE PIÙ VELOCI DELLA LUCE?

SBAGLIATO: Naturalmente no. La luce di queste galassie viene trascinata via.

Consideriamo una galassia che si trova al di là della distanza di Hubble (*sfera*), il che significa che recede a velocità maggiore della luce. La galassia emette un fotone (*in giallo*). Mentre il fotone viaggia nello spazio, lo spazio si espande. La distanza dalla Terra aumenta più velocemente di quanto si muova il fotone. Esso non ci raggiungerà mai.

GIUSTO: Certo che possiamo, perché la velocità di espansione cambia nel tempo.

Il fotone viene inizialmente trascinato via, come sopra. La differenza è che la distanza di Hubble non è costante, aumenta. La distanza di Hubble può aumentare fino a includere il fotone. Quando ciò avviene, il fotone si muove più velocemente di quanto aumenti la distanza dalla Terra, e così ci può raggiungere.

Alfred T. Kamajian

Questo fenomeno è simile, ma non identico, a quello che accade alla luce proveniente dalle galassie lontane. Lo spostamento verso il rosso cosmologico non è un normale effetto Doppler. Spesso i docenti lo descrivono in questo modo, rendendo un pessimo servizio ai loro studenti. Lo spostamento verso il rosso dell'effetto Doppler e il redshift cosmologico sono descritti da due formule diverse. Il primo deriva dalla relatività ristretta, che non tiene conto dell'espansione dello spazio; il secondo viene dalla relatività generale, che ne tiene conto. Le due formule sono quasi uguali per galassie vicine ma divergono per galassie distanti.

Secondo la formula dell'effetto Doppler, gli oggetti la cui velocità nello spazio si avvicina a quella della luce hanno spostamenti verso il rosso che tendono all'infinito. La lunghezza d'onda della luce che emettono diventa troppo lunga per poter essere osservata. Se ciò fosse vero per le galassie, i più lontani oggetti celesti visibili si allontanerebbero a velocità appena inferiore alla velocità della luce. Ma la formula per il redshift cosmologico porta a una conclusione diversa. Nel modello standard attuale della cosmologia, le galassie con uno spostamento verso il rosso di circa 1,5, cioè la cui luce ha una lunghezza d'onda più lunga del 50 per cento del valore di riferimento misurabile in laboratorio, recedono alla velocità della luce. Gli astronomi hanno osservato circa 1000 galassie con redshift maggiore di 1,5. Hanno cioè osservato circa 1000 oggetti che si allontanano da noi a una velocità maggiore di quella della luce. Un modo equivalente per dirlo è che noi ci stiamo allontanando da loro a una velocità maggiore di quella della luce. La radiazione cosmica di fondo a microonde è arrivata ben più lontano, e ha uno spostamento verso il rosso pari a circa 1000. Quando il plasma caldo dell'universo delle origini emise la radiazione che vediamo oggi, stava recedendo dalla nostra posizione circa 50 volte più veloce della luce.

GLI AUTORI

CHARLES H. LINEWEAVER e TAMARA M. DAVIS sono astronomi all'osservatorio di Mount Stromlo, vicino a Canberra. I loro argomenti di ricerca vanno dalla cosmologia alla vita nell'universo. Quando era all'Università della California a Berkeley, nei primi anni novanta, Lineweaver fece parte della squadra di COBE. Tamara Davis lavora alla Supernova/Acceleration Probe, un osservatorio spaziale in fase di progettazione.

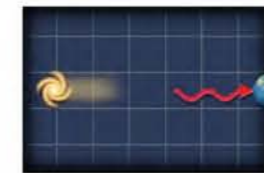
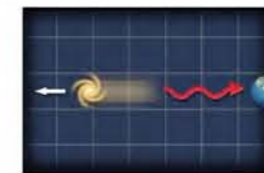
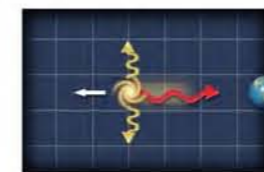
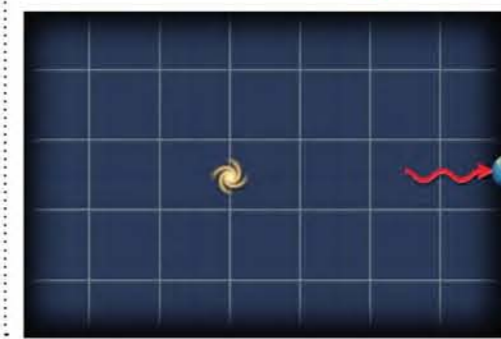
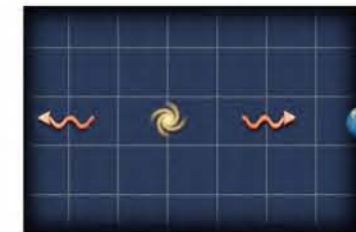
Correre per rimanere immobili

L'idea di vedere galassie più veloci della luce può suonare mistica, ma è resa possibile dalle variazioni della velocità di espansione. Immaginiamo un raggio di luce più lontano della distanza di Hubble, 14 miliardi di anni luce, che cerchi di viaggiare nella nostra direzione. Viene verso di noi alla velocità della luce rispetto al suo spazio locale, ma il suo spazio locale si allontana a una velocità maggiore di quella della luce. Sebbene la luce stia viaggiando verso di noi alla massima velocità possibile, non può tenere testa alla dilatazione dello spazio. È un po' come un bambino che cerchi di correre contromano su un tapis roulant. I fotoni alla distanza di Hubble sono come la Regina Rossa e Alice: corrono più veloci che possono solo per rimanere nello stesso posto.

Se ne potrebbe concludere che la luce al di là della distanza di Hubble non ci raggiungerà mai, e che la sua sorgente sarà invisibile per sempre. Ma la distanza di Hubble non è fissa, perché la costante di Hubble, da cui dipende, cambia con il tempo. In particolare, la costante è proporzionale alla velocità a cui aumenta la distanza tra due galassie, divisa per tale distanza. Nei modelli dell'universo in accordo con i dati osservativi, il denominatore cresce più velocemente del numeratore, e così la costante di Hubble decresce. In questo modo la distanza di Hubble aumenta. Al suo aumentare, la luce che inizialmente era appena fuori dalla distanza di Hubble, così da allontanarsi da noi, entra all'interno della distanza di Hubble. E i fotoni si ritrovano in una regione dello spazio che sta recedendo più lentamente della velocità della luce. Di lì ci potranno raggiungere. Può però accadere che la galassia da cui provenivano continui ad allontanarsi a velocità maggiore della luce. Quindi possiamo osservare la luce di galassie che si sono sempre allontanate più velocemente della luce e sempre lo faranno. In altre parole, la distanza di Hubble non è fissa, e non segna i confini dell'universo osservabile.

PERCHÉ C'È UN REDSHIFT COSMICO?

SBAGLIATO: Perché le galassie in allontanamento sono soggette a effetto Doppler.

Nell'effetto Doppler le onde luminose si allungano quando la sorgente si allontana dall'osservatore, e quindi diventano più rosse (*in alto*). Poi, la lunghezza d'onda della luce rimane costante durante il suo viaggio attraverso lo spazio (*al centro*). L'osservatore rileva la luce, ne misura lo spostamento verso il rosso e calcola la velocità della galassia (*in basso*).

GIUSTO: Perché lo spazio allunga tutte le onde luminose mentre si propagano.

Una galassia è quasi immobile nello spazio, e quindi emette luce con la stessa lunghezza d'onda in tutte le direzioni (*in alto*). La lunghezza d'onda aumenta durante il viaggio perché lo spazio si espande. Perciò la luce diventa gradualmente più rossa (*al centro e in basso*). Il redshift cosmico è diverso a livello quantitativo dall'effetto Doppler.

Alfred T. Kamajian

Che cos'è che segna i confini dell'universo osservabile? Anche qui c'è stata una certa confusione. Se lo spazio non si stesse espandendo, l'oggetto più distante che potremmo vedere sarebbe, adesso, a circa 14 miliardi di anni luce da noi, la massima distanza che la luce può aver percorso nei 14 miliardi di anni trascorsi dal big bang. Ma dato che l'universo si sta espandendo lo spazio percorso da un fotone si espande dietro di esso durante il viaggio. Di conseguenza l'attuale distanza dall'oggetto più distante che possiamo vedere è all'incirca tre volte maggiore: più o meno, 46 miliardi di anni luce.

La recente scoperta che la velocità di espansione sta aumentando rende le cose ancora più interessanti. In precedenza i cosmologi pensavano che vivessimo in un universo in decelerazione, e che sarebbe diventato visibile un numero sempre maggiore di galassie. In un universo in accelerazione, invece, siamo circondati da una frontiera oltre la quale si svolgono eventi che non vedremo mai: un orizzonte degli eventi cosmico. Perché ci raggiunga la luce delle galassie che recedono più velocemente della luce, la distanza di Hubble deve aumentare, ma in un universo in accelerazione smette di aumentare. Eventi distanti possono emettere luce nella nostra direzione, ma questa resta intrappolata al di là della distanza di Hubble per l'accelerazione dell'espansione.

Un universo in accelerazione, quindi, assomiglia a un buco nero nel senso che ha un orizzonte degli eventi, un bordo oltre il quale non si può vedere. La distanza attuale dal nostro orizzonte degli eventi cosmico è di 16 miliardi di anni luce, ben all'interno del raggio di ciò che è osservabile. La luce emessa dalle galassie che oggi si trovano oltre l'orizzonte degli eventi cosmico non potrà mai raggiungerci; la distanza che attualmente corrisponde a 16 miliardi di anni luce si espanderà troppo rapidamente. Saremo ancora in grado di vedere gli eventi che ebbero luogo in certe galassie prima che attraversassero l'orizzonte, ma gli eventi successivi saranno per sempre invisibili.

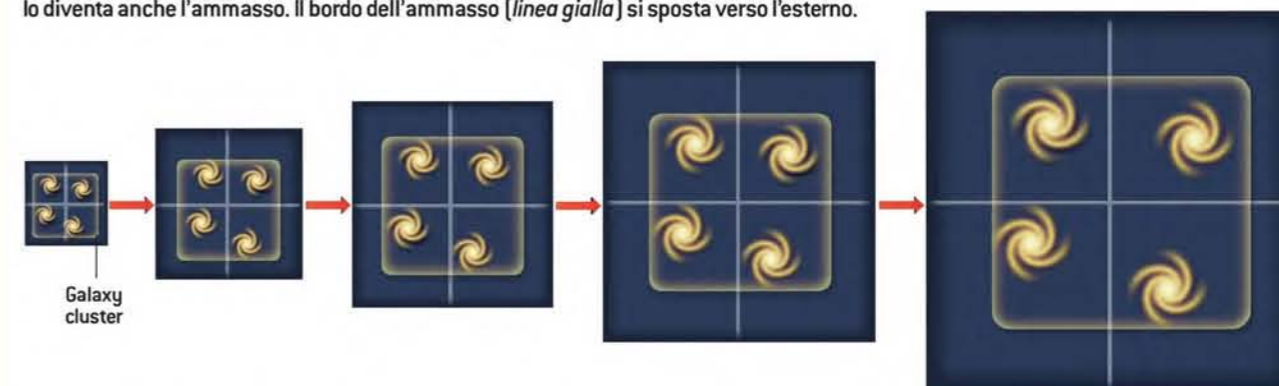
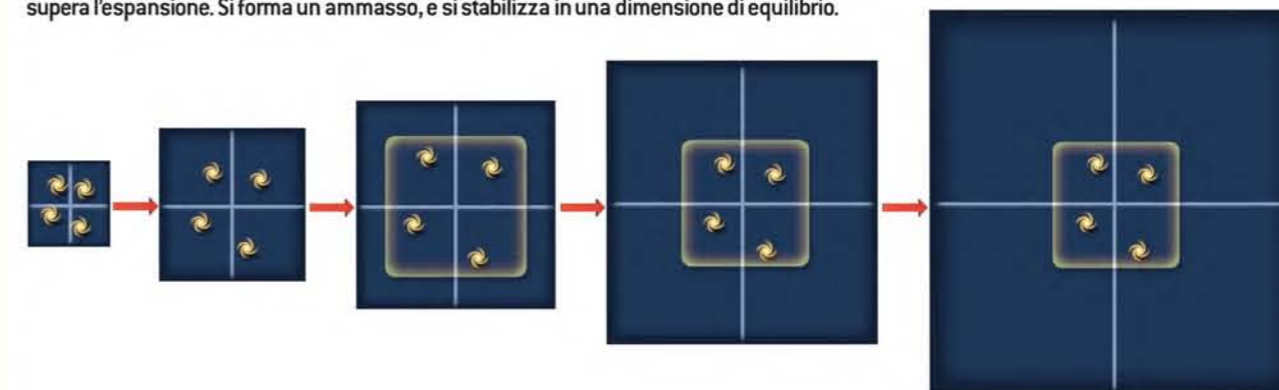
Brooklyn si sta dilatando?

In *Io e Annie*, il personaggio del giovane Woody Allen spiega al suo medico e a sua madre perché non può fare i compiti: «L'universo si sta dilatando... L'universo è tutto, e si sta dilatando. Questo significa che un bel giorno scoppierà e allora quel giorno sarà la fine di tutto!» Ma sua madre la sa più lunga di lui: «Tu sei qui, a Brooklyn. E Brooklyn non si sta dilatando!»

Ebbene, ha ragione sua madre. Brooklyn non si sta dilatando. Spesso si pensa che, visto che lo spazio si espande, anche tutto ciò che è in esso si espanda. Ma non è vero. L'espansione di per sé non produce forze. La lunghezza d'onda dei fotoni si espande insieme all'universo perché, a differenza degli atomi e delle città, i fotoni non sono oggetti coerenti le cui dimensioni sono fissate da un compromesso tra varie forze. Un mutamento della velocità di espansione aggiunge una nuova forza a quelle già presenti, ma nemmeno essa fa espandere o contrarre gli oggetti.

Per esempio, se la gravità diventasse più forte, la nostra spina dorsale si comprimerebbe fino al momento in cui gli elettroni nelle vertebre trovano un nuovo equilibrio lievemente più vicini tra loro. Saremmo più bassi, ma non continueremmo a restringerci. Allo stesso modo, se vivessimo in un universo dominato dalla forza di attrazione gravitazionale, come riteneva la maggior parte dei cosmologi fino a qualche anno fa, l'espansione decelererebbe, esercitando una lieve stretta sui corpi in tutto l'universo e facendo sì che raggiungano un equilibrio in cui sono un po' più piccoli. Ma poi non continuerebbero a restringersi.

In realtà, l'espansione sta accelerando, e ciò esercita una lieve forza che fa espandere i corpi. Perciò gli oggetti sono lievemente più grandi di quanto lo sarebbero in un universo non in accelerazione, perché l'equilibrio tra le forze si raggiunge per dimensioni lievemente maggiori. Alla superficie della Terra l'accelerazione nella direzione che si allontana dal centro del pianeta è pari a una minuscola frazione (10^{-30}) della normale accelerazione gravitazionale. Se questa accelerazione è costante, non fa espandere la Terra; il pianeta si limita a raggiungere un equilibrio stabile con dimensioni appena maggiori di quelle che avrebbe altrimenti.

Il ragionamento cambia se l'accelerazione non è costante, come è stato ipotizzato. Se l'accelerazione aumentasse, a un certo punto potrebbe diventare abbastanza forte da svellere tutte le strutture, portando a un *big rip*, un grande strappo. Ma questo strappo non avverrebbe a causa dell'espansione o dell'accelerazione di per sé, bensì a causa di un'accelerazione che accelera.

Il modello del big bang è basato su osservazioni dell'espansione: la radiazione cosmica di fondo a microonde, la composizione chimica dell'universo e il modo in cui è ammassata la materia. Come tutte le idee scientifiche, un giorno potrebbe essere superato. Ma per ora spiega i dati meglio di qualunque altra teoria. Via via che nuove misurazioni permettono di capire meglio l'espansione e l'accelerazione, ci possiamo porre domande anche più fondamentali a proposito dei primissimi momenti dell'universo. Che cosa causò l'espansione? Molti cosmologi la attribuiscono all'inflazione, un processo di espansione in accelerazione. Ma questa può essere solo una risposta parziale, perché sembra che per cominciare l'inflazione l'universo dovesse essere già in espansione. E che dire dei fenomeni che si verificano su grandissima scala, al di là di ciò che possiamo vedere? È possibile che regioni diverse dell'universo si espandono a velocità differenti, e che il nostro universo sia una singola bolla inflazionaria di un «multiverso» molto più grande? Nessuno lo sa. Anche se molte questioni restano aperte, osservazioni sempre più precise fanno pensare che l'universo si espanderà per sempre. Speriamo almeno che col tempo si contragga la confusione a proposito dell'espansione. ■

PER APPROFONDIRE

HARRISON E.R., *Cosmology: The Science of Universe*, Cambridge University Press, 2000.

MOLARO P., LEVSHAKOV S.A., DESSAUGES-ZAVADSKY M. e D'ODORICO S., *The Cosmic Microwave Background Radiation Temperature at z = 3.025 toward QSO 0347–3819*, in «Astronomy and Astrophysics», vol. 381, n. 3, pp. L64-L67, gennaio 2002. Disponibile in rete all'indirizzo: arxiv.org/abs/astro-ph/0111589.

DAVIS T.M., LINEWEAVER C.H. e WEBB J.K., *Solutions to the Tethered Galaxy Problem in an Expanding Universe and the Observation of Receding Blue Shifted Objects*, in «American Journal of Physics», vol. 71, n. 4, pp. 358-364, aprile 2003. Disponibile in rete all'indirizzo: astro-ph/0104349.

DAVIS T.M. e LINEWEAVER C.H., *Expanding Confusion: Common Misconceptions of Cosmological Horizons and the Superluminal Expansion of the Universe*, in «Publications of the Astronomical Society of Australia», vol. 21, n. 1, pp. 97-109, febbraio 2004. Disponibile in rete all'indirizzo: astro-ph/0310808.

Un'altra eccellente risorsa per evitare confusioni in campo cosmologico è la guida alla cosmologia compilata da Ned Wright, reperibile all'indirizzo web: www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm.

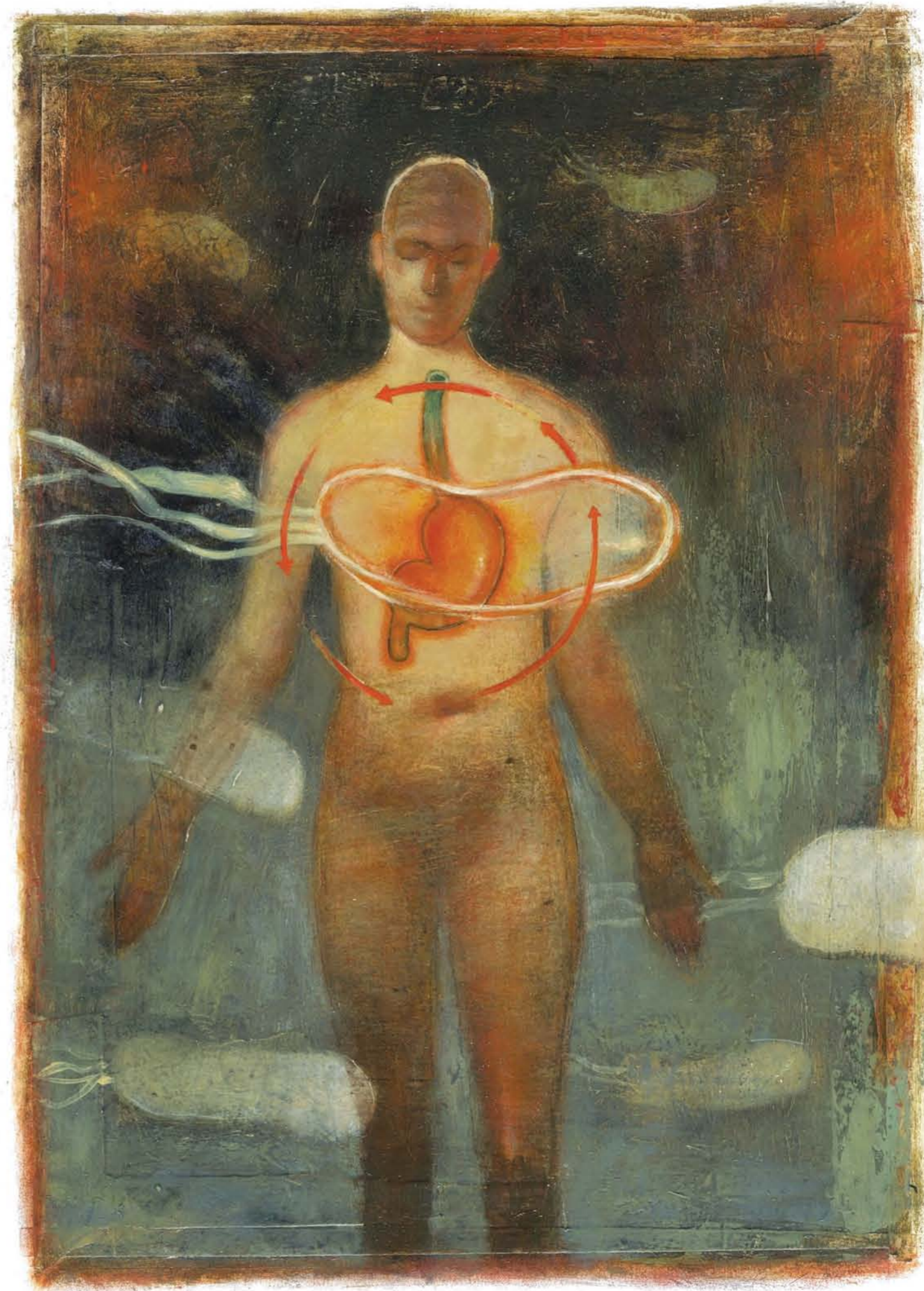
DOPPIO EFFETTO. Fra gli esseri umani ed *Helicobacter pylori*, il batterio che può provocare un'infiammazione gastrica (*in rosso*) ma che può anche proteggere l'esofago (*in verde*), si è instaurato uno stretto rapporto, in cui i microrganismi e le cellule umane si scambiano segnali complessi.

Un batterio in via di estinzione

La progressiva scomparsa di *Helicobacter pylori*, il batterio che da tempo immemorabile vive nello stomaco degli esseri umani, è un vantaggio o uno svantaggio per la nostra salute?

di Martin J. Blaser

H*elicobacter pylori* è uno dei compagni più antichi e assidui dell'umanità, ma gli scienziati hanno impiegato più di un secolo per riconoscerlo. Nel 1875 un anatomista tedesco scoprì che alcuni batteri dalla morfologia a spirale colonizzavano la mucosa gastrica degli esseri umani, ma poiché non si riuscì a farli crescere sotto forma di coltura pura, il risultato fu ignorato e finì nel dimenticatoio. Fu solo nel 1982 che due medici australiani, Barry J. Marshall e J. Robin Warren, isolarono il batterio e iniziarono i primi studi seri sul ruolo di *H. pylori* nello stomaco. Nel decennio seguente si scoprì che le persone che ospitavano questi organismi correvano un rischio maggiore di sviluppare ulcere peptiche – lesioni parietali a carico della mucosa che riveste lo stomaco o il duodeno – e che *H. pylori* poteva anche provocare l'inizio della forma più comune di tumore gastrico (si veda *Il batterio che causa l'ulcera peptica*, di Martin J. Blaser, in «Le Scienze» n. 332, aprile 1996).

Joseph Daniel Fiedler

Ma proprio quando iniziavano a capire quanto fosse importante *H. pylori*, gli scienziati scoprirono che nel tratto digestivo degli esseri umani questi batteri si stavano progressivamente indebolendo. Se da un lato quasi tutti gli individui adulti dei paesi in via di sviluppo continuano a essere portatori dell'organismo, dall'altro questo batterio mostra una prevalenza nettamente inferiore nei paesi sviluppati, come gli Stati Uniti, tanto che gli epidemiologi ritengono che negli ultimi 100 anni *H. pylori* stia scomparendo dai paesi industrializzati grazie al miglioramento complessivo delle condizioni igieniche, che arrestano la trasmissione batterica, e all'ampio uso di antibiotici.

In corrispondenza di una diminuzione della presenza di *H. pylori* si è registrato un calo nelle percentuali di casi di ulcera peptica e di tumore gastrico. Ma allo stesso tempo le malattie dell'esofago – inclusi il reflusso gastroesofageo e una forma particolarmente micidiale di tumore – sono aumentate drammaticamente, e una quantità consistente di prove indica che l'insorgenza di queste malattie è collegata anche alla scomparsa di *H. pylori*.

La possibilità che questo batterio sia davvero in grado di fornire una sorta di protezione contro le malattie esofagee ha conseguenze significative. Per esempio, è probabile che si debbano rivedere le terapie antibiotiche che eliminano *H. pylori* dallo stomaco in modo da garantire che i potenziali danni non superino i benefici. Per capire fino in fondo gli effetti di *H. pylori* sulla salute, i ricercatori devono analizzare la complessa rete di interazioni esistente fra questo straordinario microrganismo e i suoi ospiti.

In sostanza, lo studio di *H. pylori* potrebbe aiutarci a conoscere gli altri batteri che colonizzano il corpo umano, come pure i processi evolutivi che consentono agli uomini e ai batteri di sviluppare rapporti così profondi gli uni con gli altri.

La prevalenza di ***Helicobacter pylori*** è molto più bassa nei paesi sviluppati come gli Stati Uniti

In sintesi/*Effetti di un microbo*

- *Helicobacter pylori* ha colonizzato per molto tempo lo stomaco degli esseri umani, ma il miglioramento delle condizioni igieniche e l'introduzione degli antibiotici hanno drasticamente ridotto la prevalenza del batterio nei paesi sviluppati nel corso dell'ultimo secolo.
- Le persone che ospitano *H. pylori* nel loro organismo corrono un rischio maggiore di sviluppare ulcere peptiche e tumori gastrici, ma contemporaneamente presentano un rischio inferiore di venir colpiti da malattie dell'esofago, tra cui una forma mortale di tumore esofageo.
- Studi sulle interazioni fra *H. pylori* e gli esseri umani possono condurre alla scoperta di terapie più efficaci per combattere disturbi dell'apparato digerente, oltre che a una migliore comprensione del comportamento di altri batteri che colonizzano il corpo umano.

Un batterio ad alta variabilità

Appena si cominciò a studiare *H. pylori*, fu subito evidente che i ceppi batterici isolati da individui diversi erano assai differenti fra loro. Nello stesso stomaco, infatti, si possono trovare anche numerosi ceppi differenti, i quali, sebbene siano apparentemente identici, dal punto di vista genetico mostrano una considerevole eterogeneità. I ricercatori hanno determinato la sequenza completa del DNA genomico di due ceppi diversi di *H. pylori*: ciascuno di essi ha un unico piccolo cromosoma costituito approssimativamente da 1,7 milioni di nucleotidi e comprendente circa 1550 geni. Per fare un confronto, *Escherichia coli*, un batterio che popola l'intestino umano, ha circa cinque milioni di nucleotidi, mentre gli esseri umani hanno circa tre miliardi. L'aspetto straordinario è dato dal fatto che circa il sei per cento dei geni di *H. pylori* non è condiviso tra questi due ceppi, e che anche i geni in comune mostrano una significativa variabilità nelle loro sequenze nucleotidiche.

Questo livello di diversità intraspecifico è davvero straordinario. In confronto alle differenze esistenti fra i ceppi di *H. pylori*, quelle genetiche fra gli esseri umani e gli scimpanzé, vale a dire due specie distinte, sono ridottissime: le sequenze nucleotidiche del genoma dell'uomo e dello scimpanzé, infatti, sono identiche al 99 per cento.

La considerevole variabilità che caratterizza il genoma di *H. pylori* suggerisce due ipotesi: la prima prevede che questi batteri esistano da molto tempo come specie ben definita, mentre la seconda ipotizza che qualche particolare variante non si sia adattata così bene allo stomaco umano da entrare in competizione con tutte le altre. In realtà, entrambe le affermazioni sono corrette.

Nel mio laboratorio abbiamo identificato due particolari tipi di variante. Nel 1989 abbiamo creato una libreria di geni di *H. pylori* inserendo alcuni frammenti selezionati di DNA batterico in cellule di *E. coli*, un ospite che poi è in grado di produrre le proteine codificate dai geni di *H. pylori*. In seguito, abbiamo analizzato i campioni di *E. coli* ottenuti con questo sistema utilizzando il siero di un individuo (che poi ero io...) che ospitava nel proprio stomaco *H. pylori*; poiché il mio sistema immunitario era venuto in contatto con il batterio, gli anticorpi presenti nel mio siero avrebbero dovuto riconoscere alcuni dei prodotti proteici dell'organismo. Il primo campione riconosciuto dai miei anticorpi conteneva un gene che attualmente chiamiamo *cagA*, che codifica per l'omonima proteina. Questo è stato il primo gene di *H. pylori* a essere ritrovato in alcuni ceppi, ma non in tutti, del batterio.

Successive ricerche hanno rivelato che le persone infettate da ceppi di *H. pylori* contenenti il gene *cagA* corrono un maggior rischio di ammalarsi di ulcera peptica o di tumore gastrico rispetto alle persone che ospitano ceppi privi dello stesso gene.

Ora sappiamo che il gene *cagA* si trova in una regione del

INTERAZIONI NELLO STOMACO

Helicobacter pylori è in grado di sopravvivere per decenni nello stomaco umano, provocando un danno continuo malgrado la risposta immunitaria dell'ospite. I ricercatori ritengono che vi sia uno scambio di segnali fra i batteri e l'ospite attraverso un meccanismo di feedback negativo, che riduce il danno tissutale e mantiene stabile l'ambiente per i batteri.

COLONIZZATO DA *H. PYLORI*

Un esempio delle interazioni di *H. pylori* con il suo ospite umano è la regolazione dell'acidità nello stomaco. Quando l'acidità è troppo alta per il batterio, i ceppi portatori del gene *cagA* producono grandi quantità della proteina CagA, che scatena una risposta infiammatoria da parte dell'ospite. L'infiammazione fa diminuire l'acidità influenzando la regolazione ormonale delle cellule che producono l'acido nella mucosa gastrica.

Esofago
Stomaco
Duodeno
Infiammazione della mucosa gastrica, minore acidità
Acido gastrico
Strato mucoso

LIBERO DA *H. PYLORI*

Le persone che non ospitano *H. pylori* corrono un minor rischio di ammalarsi di ulcera peptica o di tumori gastrici, perché non sviluppano l'infiammazione scatenata dal batterio. Ma poiché i non dispongono di meccanismi di controllo batterico sull'acidità gastrica, sono più vulnerabili a malattie esofagee causate dall'esposizione del tratto inferiore dell'esofago ai contenuti gastrici altamente acidi.

Infiammazione del tratto inferiore dell'esofago
Maggiore acidità

H. pylori
Sistema di secrezione della proteina CagA
Secrezione della proteina VacA
Cellule epiteliali
Proteina CagA
Cellule danneggiate
Nucleo
Formazione di fori
Radicali liberi
Citochine
Neutrofilo
Proteina VacA
Linfocita T immobilizzato

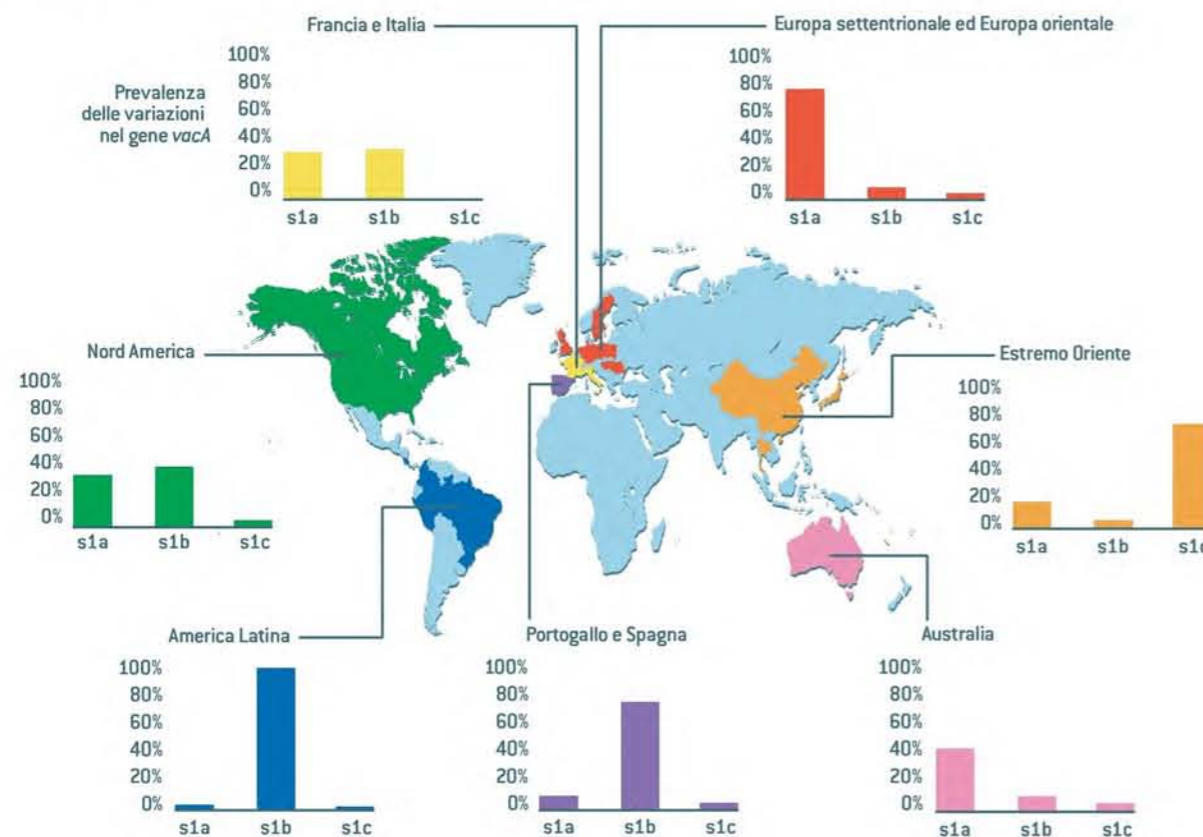
MECCANISMI DI INTERAZIONE

Per iniettare la proteina CagA nelle cellule epiteliali della mucosa gastrica, *H. pylori* utilizza un sistema di secrezione di tipo IV, una struttura simile a un ago ipodermico.
Le cellule rilasciano proteine che favoriscono l'infiammazione (citochine), le quali attraggono i globuli bianchi conosciuti come neutrofili, che danneggiano il tessuto gastrico liberando composti azotati e ossigenati altamente reattivi (radicali liberi).

H. pylori secerne anche la proteina VacA, la quale forma dei fori all'interno delle cellule epiteliali e frena la risposta immunitaria immobilizzando un altro tipo di globuli bianchi (linfociti T helper).

Tami Tolpa

UN MONDO DI VARIAZIONI

Dal punto di vista genetico *H. pylori* è un organismo molto eterogeneo, e i diversi ceppi tendono a raggrupparsi in alcune aree geografiche, perché i batteri seguono le migrazioni degli esseri umani intorno al globo. La variante s1a del gene *vacA* è predominante nel nord Europa, mentre le varianti s1b e s1c prevalgono rispettivamente nell'area mediterranea e in Estremo Oriente.

Lucy Reading-Ikkanda

cromosoma di *H. pylori* in cui sono situati anche dei geni che codificano per proteine che formano un sistema di secrezione di tipo IV (TFSS). Le cellule batteriche assemblano questi sistemi per esportare nelle cellule ospiti molecole grandi e complesse: il batterio che provoca la pertosse, per esempio, *Bordetella pertussis*, utilizza un sistema TFSS per introdurre la propria tossina nelle cellule del tratto respiratorio degli esseri umani. Nel 2000 alcuni gruppi di ricerca in Germania, Giappone, Italia e negli Stati Uniti hanno stabilito che alcuni geni di *H. pylori* situati in prossimità del gene *cagA* codificano per proteine TFSS che si assemblano a formare una struttura analoga a un ago ipodermico in miniatura (*si veda il box a p. 65*): questa struttura inietta la proteina CagA nelle cellule epiteliali che rivestono lo stomaco umano, il che spiega la ragione per cui il mio corpo ha prodotto anticorpi specifici per quella proteina.

Dopo l'entrata di CagA nella cellula epiteliale, gli enzimi dell'ospite trasformano chimicamente la proteina consentendole di interagire con diverse proteine umane. Queste interazioni, in definitiva, influiscono sulla morfologia della cellula, sulle proteine che secerne e sui segnali che invia ad altre cellule. A livello di mucosa gastrica i ceppi di *H. pylori* che contengono il gene *cagA* provocano reazioni infiammatorie e lesioni tissutali più gravi rispetto ai ceppi in cui il gene non c'è: queste differenze possono spiegare l'aumento del rischio di malattie in persone in cui si ritrovano i ceppi *cagA*.

Alla fine degli anni ottanta Timothy Cover cominciò a studiare alcuni ceppi di *H. pylori* che nelle cellule epiteliali in coltura provocavano la formazione di ampi fori, chiamati vacuoli. Riuscimmo a dimostrare che l'agente attivo era una tossina, ribattezzata VacA, codificata da un gene che chiamammo *vacA*. Oltre a formare i vacuoli, nello stomaco VacA disattiva i globuli bianchi deputati a combattere le infezioni, riducendo la risposta immunitaria verso *H. pylori*. A differenza del gene *cagA*, il gene *vacA* è presente in ogni ceppo di *H. pylori*, ma poiché la sua sequenza varia in maniera sostanziale solo alcuni ceppi producono una tossina completamente funzionale. John C. Atherton scoprì quattro varianti genotipiche principali nel gene *vacA*: due di esse (m1 e m2) sono situate nella regione centrale del gene, mentre le altre due (s1 e s2) si trovano nella regione che codifica per la sequenza segnale della proteina, una sequenza che le consente di attraversare le membrane cellulari. Studi successivi hanno dimostrato che il genotipo s1 poteva essere suddiviso in almeno tre sottotipi: s1a, s1b e s1c.

I ceppi di *H. pylori* che presentano contemporaneamente il genotipo m1/s1 producono la forma più tossica della tossina VacA. Di conseguenza, non sorprende che i ceppi portatori di questo genotipo di *vacA*, combinato con il gene *cagA*, siano associati al rischio più elevato di tumore gastrico.

A rendere le cose ancora più complicate è il fatto che alcune persone risultano più suscettibili nei confronti di questi tipi di tumore a causa di mutazioni, presenti nei loro geni, che accrescono la risposta infiammatoria agli agenti batterici. Lo scenario peggiore si ha quando una persona è portatrice delle mutazioni che favoriscono l'infiammazione ed è colonizzata da ceppi di *H. pylori* contenenti il gene *cagA* e il genotipo s1/m1 *vacA*. Lo scontro che avviene fra ceppi particolarmente aggressivi di *H. pylori* e ospiti particolarmente sensibili sembra dare una giustificazione alla maggior parte dei casi di tumori gastrici.

Seguendo le tracce delle migrazioni

Una volta scoperto come distinguere fra i ceppi di *H. pylori* raccolti in giro per il mondo, gli scienziati hanno cominciato ad analizzarli per vedere se i ceppi che circolavano nelle diverse aree differivano l'uno dall'altro. Lavorando con Leen-Jan van Doorn del Delft Diagnostic Laboratory, in Olanda, scoprimmo che le variazioni del gene *vacA* tendevano a raggrupparsi in certe regioni geografiche: i ceppi s1c erano predominanti in Estremo Oriente, quelli s1a nel Nord Europa e gli s1b nell'area mediterranea (*si veda il box nella pagina a fronte*).

Al mio collega Guillermo I. Perez-Perez e a me interessava particolarmente studiare i ceppi di *H. pylori* presenti in America Latina perché avrebbero potuto indicarci quando e come i batteri erano giunti nel Nuovo Mondo. Inizialmente scoprimmo che il ceppo mediterraneo, l's1b, era di gran lunga il più comune: questo sembrava suggerire che *H. pylori* fosse stato introdotto dai coloni spagnoli e portoghesi o dagli schiavi africani.

Ma gli studi erano stati condotti solo nelle città costiere dell'America Latina, i cui abitanti discendono da un miscuglio di europei, africani e amerindi. Collaborando con Maria Gloria Dominguez Bello del Venezuelan Institute for Scientific Research, analizzammo campioni di stomaco di una popolazione amazzonica indigena, scoprendo che la maggior parte dei ceppi aveva il genotipo s1c, che risulta prevalente in Estremo Oriente. Questo lavoro ha provato che *H. pylori* è stato trasportato attraverso lo Stretto di Bering dagli antenati degli attuali amerindi e che, di conseguenza, alberga negli esseri umani da almeno 11.000 anni.

Collaborazioni più recenti con Mark Achtman, Daniel Falush e i loro colleghi del Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie di Berlino hanno dimostrato che è possibile far risalire tutti i ceppi moderni di *H. pylori* a cinque popolazioni antiche, due delle quali sorte in Africa, due nell'Eurasia occidentale o centrale e una in Estremo Oriente.

Di fatto, le variazioni genetiche di *H. pylori* possono essere sfruttate per seguire le tracce degli stanziamenti e dei percorsi migratori degli esseri umani nel corso degli ultimi 60.000 anni. Poiché i vari ceppi di *H. pylori* sono così profondamente diversi tra loro dal punto di vista genetico rispetto a *Homo sapiens*, i batteri possono far luce sulla storia degli spostamenti delle popolazioni molto meglio del DNA mitocondriale umano (l'indicatore comunemente usato per queste ricerche).

Agli effetti della datazione delle migrazioni della nostra specie, gli studi mitocondriali possono servire a conoscere dove sta la lancetta delle ore, ma le sequenze geniche di *H. pylori* sono in grado di fornire indicazioni più accurate sulla lancetta dei minuti.

Le variazioni genetiche di *H. pylori* possono essere usate per ricostruire le migrazioni umane

Un'estinzione microbica

Gli esseri umani sono gli unici ospiti di *H. pylori*, e la diffusione del batterio implica una trasmissione per via orale o oro-fecale. Le differenze geografiche nel tasso d'infezione di *H. pylori* potrebbero essere, in parte, il risultato del miglioramento delle condizioni igieniche avvenuto nel secolo scorso nei paesi sviluppati. Personalmente ritengo però che alla graduale eliminazione di *H. pylori* abbia contribuito anche la diffusione degli

L'AUTORE

MARTIN J. BLASER è uno dei maggiori esperti mondiali di *Helicobacter pylori*. È Frederick King Professor of Internal Medicine, preside del Dipartimento di medicina e professore di microbiologia alla New York University School of Medicine. In passato, Blaser ha lavorato all'Università del Colorado, ai Centers for Disease Control and Prevention, alla Rockefeller University e alla Vanderbilt University. Ha scritto oltre 400 articoli scientifici e ha curato l'edizione di diversi libri sulle malattie infettive. Inoltre, è presidente della Infectious Diseases Society of America.

DENTRO DI NOI. L'habitat di *H. pylori*, ingrandito 4000 volte in questa fotografia al microscopio elettronico a scansione, è lo strato mucoso che riveste lo stomaco umano.

Photo Insolite Realite & V. Gremet/Photo Researchers, Inc.

antibiotici. In alcuni soggetti una terapia antibiotica, anche di breve durata, porta alla scomparsa dei batteri. Nei paesi in via di sviluppo, dove gli antibiotici sono usati con minore frequenza, dal 70 al 100 per cento dei bambini viene infettato da *H. pylori* entro il decimo anno di età, e la maggior parte continua a ospitare il batterio per il resto della vita; al contrario, oggi meno del dieci per cento dei bambini nati negli Stati Uniti è portatore del microrganismo. Questo divario costituisce un cambiamento radicale nella microecologia umana.

La scomparsa di *H. pylori* potrebbe essere un campanello d'allarme per l'estinzione di altre specie batteriche. *H. pylori* è il solo batterio che può resistere nell'ambiente acido dello stomaco umano, e la sua presenza può essere facilmente determinata mediante test del sangue, delle feci, del tessuto respiratorio o gastrico. Tuttavia, anche altre zone del corpo, come la bocca, il colon, la pelle e la vagina, mostrano una complessa popolazione di organismi autoctoni: se un altro batterio comune stesse scomparendo da questi tessuti, non avremmo gli strumenti diagnostici per rilevare il suo declino.

Quali sono le conseguenze della scomparsa di *H. pylori*? Come si è visto, l'incidenza delle ulcere peptiche (eccetto quelle causate dall'aspirina e dai FANS, i farmaci antinfiammatori non steroidei, come l'ibuprofen) e dei tumori gastrici sta chiaramente diminuendo nei paesi sviluppati. Poiché queste malattie, e in particolare il tumore gastrico, hanno bisogno di molti anni per svilupparsi, la loro riduzione segue di diversi decenni il declino dell'infezione di *H. pylori*; nondimeno, si tratta di una diminuzione sorprendente. Nel 1900 il tumore allo stomaco era la causa principale di decesso per tumore negli Stati Uniti; nel 2000 l'incidenza e i tassi di mortalità sono diminuiti almeno dell'80 per cento, collocando questi tumori ben al di sotto dei tassi di mortalità dovuta a tumori del colon, della prostata, del seno e dei polmoni. Prove sostanziali indicano che la progressiva estinzione di *H. pylori* ha avuto un ruolo importante in questo fenomenale cambiamento. E questa è la buona notizia.

Allo stesso tempo, però, si è verificato un aumento inatteso dell'incidenza di una nuova classe di malattie che interessano l'esofago. A partire dall'inizio degli anni settanta, epidemiologi statunitensi, britannici, svedesi e australiani hanno osservato un allarmante aumento dei casi di adenocarcinoma esofageo, un tumore aggressivo che si sviluppa sulla mucosa interna dell'esofago proprio sopra lo stomaco. L'incidenza annuale di questa malattia negli Stati Uniti sta salendo dal sette al nove per cento, trasformandola nel tumore principale con il più rapido incremento nel paese. Dal momento della diagnosi, il tasso di sopravvivenza a cinque anni per l'adenocarcinoma esofageo è inferiore al dieci per cento.

PRO E CONTRO. Il declino di *H. pylori* nei paesi sviluppati negli ultimi 100 anni ha ridotto l'incidenza del tumore gastrico, ma può aver scatenato un improvviso aumento delle malattie esofagee. In alcuni casi, il reflusso acido provoca l'esofago di Barrett (una lesione pre-cancerogena), e poi l'adenocarcinoma, un tumore particolarmente aggressivo. Poiché i dati storici su alcuni disturbi sono incompleti, il diagramma mostra soltanto l'andamento generale dell'incidenza della malattia.

Cattive notizie

Qual è l'origine di questo tumore fatale? Sappiamo che il fattore primario di rischio è la malattia da reflusso gastroesofageo (GERD), un'infiammazione cronica che provoca il rigurgito del contenuto acido stomacale nell'esofago. Più comunemente nota come reflusso acido, fino agli anni trenta la GERD non era stata neppure descritta nella letteratura medica. Da quel momento, invece, la sua incidenza è drammaticamente aumentata e oggi il disturbo è assai comune negli Stati Uniti e in altri paesi occidentali. La GERD può provocare il cosiddetto esofago di Barrett, una lesione pre-cancerogena descritta per la prima volta nel 1950 dal chirurgo britannico Norman Barrett. L'incidenza dell'esofago di Barrett sta aumentando parallelamente alla GERD, e i pazienti affetti da questo tipo di lesione corrono un rischio maggiore di sviluppare l'adenocarcinoma esofageo. È sempre più evidente che la GERD può dare inizio a un processo di durata variabile, compresa fra i 20 e i 50 anni: in alcuni casi il disturbo progredisce lentamente verso l'esofago di Barrett e successivamente verso l'adenocarcinoma, e va di pari passo con i cambiamenti graduali che portano a sviluppare tumori in altri tessuti epiteliali (*si veda il grafico in alto*). Ma perché la GERD e i successivi disturbi stanno diventando più comuni?

Queste malattie hanno iniziato a manifestarsi proprio in concomitanza con il declino di *H. pylori*, e l'idea che sia possibile associare i due fenomeni è allettante. Quando proposi per la prima volta questa connessione, nel 1996, le reazioni iniziali furono di indifferenza e poi di ostilità. In anni recenti, però, un numero crescente di studi conferma l'ipotesi che la colonizzazione dello stomaco da parte di *H. pylori* protegga realmente l'esofago nei confronti della GERD e delle sue conseguenze. Per di più, i ceppi portatori del gene *cagA* – cioè, i batteri che si dimostrano più virulenti nel provocare ulcere e tumori gastrici – sembrano quelli in grado di offrire il maggior effetto protettivo nei confronti dell'esofago!

Nel 1998, mentre collaboravamo con ricercatori del National Cancer Institute, scoprimmo che i portatori dei ceppi *cagA* di *H. pylori* correvano un rischio significativamente inferiore di sviluppare adenocarcinomi nel tratto inferiore dell'esofago e nella zona dello stomaco più vicina all'esofago. In seguito, in collaborazione con alcuni colleghi della Cleveland Clinic e dell'Erasmus Medical Center in Olanda, abbiamo dimostrato una correlazione analoga sia per la GERD che per l'esofago di Barrett. Conferme indipendenti sono giunte dal Regno Unito, dal Brasile e dalla Svezia. Non tutti i ricercatori hanno ottenuto questi risultati, forse a causa delle differenze metodologiche nello studio, ma in ogni caso, ora le prove scientifiche sono convincenti.

Una teoria di interazioni

Com'è possibile che la colonizzazione da parte di *H. pylori* aumenti il rischio di malattie gastriche e contemporaneamente protegga contro i disturbi esofagei? Una possibile spiegazione chiama in causa le interazioni fra il batterio e il suo ospite umano. *H. pylori* si è evoluto come un parassita davvero atipico: è in grado di resistere nello stomaco per decenni, nonostante il danno continuo che provoca e nonostante la risposta immunitaria esercitata dall'ospite nei confronti del danno. Questa resistenza richiede che praticamente tutti gli eventi «stimolanti» che provocano l'infiammazione nel tessuto gastrico siano bilanciati da eventi «inibenti/down-regolatori», che impediscono al danno di aggravarsi troppo repentinamente. Fra il batterio e l'ospite deve esserci un equilibrio, altrimenti l'ospite morirebbe troppo rapidamente e i batteri perderebbero la loro «abitazione» prima di avere l'opportunità di propagarsi a un altro individuo.

Ma come fanno a raggiungere questo equilibrio due forme di vita in competizione fra loro? La mia ipotesi è che il microbo e l'ospite comunichino fra loro attraverso un sistema di feedback negativo.

I meccanismi di feedback negativo sono comuni nel mondo biologico, perché servono alla regolazione delle interazioni cellulari. Si consideri, per esempio, il sistema a feedback che coinvolge il glucosio e l'ormone regolatore insulina. Dopo il pasto, i livelli di glucosio ematico aumentano e il pancreas secerne l'insulina. Questo ormone provoca la diminuzione dei livelli di glucosio, e così facendo segnala al pancreas che è necessario ridurre la propria secrezione. Modulando i livelli massimi e minimi della concentrazione di glucosio il sistema mantiene uno stato costante chiamato omeostasi. Descritto per la prima volta nel XIX secolo dal fisiologo francese Claude Bernard, questo concetto è divenuto fondamentale per la comprensione della regolazione ormonale.

Firefly Productions/Corbis/Contrasto

In sostanza, ho ulteriormente sviluppato la seguente idea: il meccanismo di feedback può coinvolgere tanto le cellule microbiche quanto le cellule ospiti. Negli corso degli anni, collaborando con i matematici Denise Kirschner dell'Università del Michigan ad Ann Arbor e Glenn Webb della Vanderbilt University, il nostro concetto di feedback si è fatto via via più complesso ed esaustivo. Secondo la formulazione che ne diamo oggi, la popolazione di *H. pylori* presente nello stomaco di un individuo è costituita da un gruppo di ceppi estremamente variegati, che cooperano e competono gli uni con gli altri: entrano in competizione per i nutrienti, per accaparrarsi delle nicchie nello stomaco e per proteggersi dagli stress. Nel corso dei millenni, la lunga coevoluzione di *Helicobacter pylori* e *Homo sapiens* ha esercitato un'intensa pressione selettiva su entrambe le specie. Per minimizzare il danno provocato dall'infezione, gli esseri umani hanno sviluppato una strategia per comunicare con i batteri: attraverso le risposte immunitarie e i cambiamenti di pressione e di acidità nello stomaco, *H. pylori*, a sua volta, è in grado di inviare segnali alle cellule ospiti affinché queste riducano lo stress esercitato sui batteri.

Lo studio di *H. pylori* può aiutarci a capire altri batteri che colonizzano il corpo umano

Un buon esempio di stress consistente subito da *H. pylori* è il livello di acidità gastrica. Troppo acido può uccidere i batteri, ma nemmeno un livello estremamente basso è un fatto positivo, perché consentirebbe agli organismi meno tolleranti all'acido come *E. coli* di occupare le nicchie di *H. pylori*. Di conseguenza, *H. pylori* ha sviluppato la capacità di regolare l'acidità del proprio ambiente. Per esempio, i ceppi portatori del gene *cagA* possono usare la proteina CagA come molecola di segnalazione. Quando l'acidità è elevata il gene *cagA* produce una quantità relativamente grande di proteina, la quale scatena una risposta infiammatoria da parte dell'ospite: ciò riduce l'acidità influenzando la regolazione ormonale delle cellule che secernono l'acido a livello della parete gastrica. Al contrario, una bassa acidità limita la produzione di CagA e quindi riduce l'infiammazione.

Questo modello di feedback negativo ci aiuta a comprendere gli effetti di *H. pylori* sulla nostra salute, che dipendono in larga misura dall'intensità delle interazioni fra i batteri e i loro ospiti. I ceppi *cagA* aumentano sostanzialmente il rischio di tumori gastrici, poiché per decenni secernono la proteina CagA nelle cellule epiteliali dello stomaco influenzando la longevità delle

cellule ospiti e la loro propensione a indurre l'infiammazione che promuove il tumore.

I ceppi privi del gene *cagA* interagiscono molto meno con l'ospite, e in questo modo non danneggiano così gravemente i tessuti gastrici. Dall'altro lato, i ceppi *cagA* modulano efficacemente la produzione di acido nello stomaco e impediscono che i livelli di acidità salgano troppo. Gli individui che ospitano ceppi privi del gene *cagA* modulano più debolmente i livelli di acidità, mentre le persone che non sono colonizzate da *H. pylori* non hanno alcun controllo microbico. L'oscillazione dell'acidità gastrica che ne deriva può risultare cruciale per l'insorgenza di malattie esofagee, che apparentemente vengono scatenate dall'esposizione del tessuto a un contenuto gastrico estremamente acido.

L'assenza di *H. pylori* può avere anche altri effetti fisiologici. Lo stomaco produce due ormoni che influenzano le abitudini alimentari: la leptina, che segnala al cervello di smettere di mangiare, e la grelina, che stimola l'appetito. L'eliminazione di *H. pylori* con gli antibiotici tende ad abbassare la leptina e ad aumentare la grelina. In uno studio, alcuni pazienti che si erano sottoposti a una terapia per eliminare *H. pylori* hanno subito un aumento ponderale maggiore rispetto ai soggetti di controllo. Può forse essere che eventuali cambiamenti nella microecologia umana contribuiscano alle odierne epidemie di obesità e di diabete mellito (una condizione legata all'obesità) in atto nei paesi sviluppati?

Se questa ricerca fosse confermata, le implicazioni sarebbero rassicuranti. I medici potrebbero trovarsi costretti a riconsiderare i trattamenti a base di antibiotici che liberano lo stomaco da *H. pylori* e che rimuovono batteri critici anche da altre parti del corpo. Sebbene alcune conseguenze di questa eliminazione potrebbero anche risultare positive (portando, per esempio, a un minor rischio di tumori gastrici), potrebbero anche esserci degli effetti negativi. Il bilancio fra un effetto positivo e uno negativo dipende molto dall'età del paziente, dalla sua storia medica e dal genotipo.

Probiotici

Se i ricercatori dovessero giungere alla conclusione che *H. pylori* è davvero in grado di procurare dei benefici ad alcuni individui, i medici dovrebbero reintrodurre il batterio nello stomaco di questi pazienti?

Da oltre un secolo, medici e persone comuni sono alla ricerca dei cosiddetti probiotici, microbi che possono essere ingeriti per contribuire al benessere dell'uomo. I primi studi si sono focalizzati sulle diverse specie di *Lactobacillus*, batteri che producono lo yogurt e molti formaggi, ma gli effetti della loro reintroduzione nella dieta si sono rivelati, tutt'al più, di valore marginale: nonostante un secolo di tentativi, i ricercatori non sono riusciti a trovare alcun probiotico davvero efficace.

Una spiegazione che potrebbe giustificare questo fallimento è data dalla complessità e dalla coevoluzione dell'intero complesso di microbioti umani, gli organismi che condividono con noi il nostro organismo. I nostri microbioti hanno raggiunto un elevato livello evolutivo che permette loro di vivere dentro di noi e assieme ad altri consimili. Qual è la probabilità che un nuovo arrivato, un ceppo di batteri provenienti dall'esterno che nulla ha a che vedere con *Helicobacter*, sia in grado di ripercorrere con successo gli schemi dell'interazione in modo da ricavarne effetti vantaggiosi? Gli organismi attuali sono sopravvissuti a una selezione dura e continua, e il vantaggio «di giocare in casa» di solito li rende capaci di respingere ed eliminare qualsiasi straniero.

Ma potrebbe sorgere una nuova era per i probiotici. Il passaggio chiave sarà acquisire maggiori conoscenze sui nostri microbioti interni e sul modo in cui interagiscono con noi. Ritengo che qualunque regione del nostro corpo colonizzata dai microbi (per esempio il colon, la bocca, la pelle e la vagina) sia teatro di complesse interazioni, ma siccome gli organismi competitori presenti in questi tessuti sono numerosi ed eterogenei, è difficile chiarire quali siano i loro rapporti reciproci.

Tuttavia, la presenza di *H. pylori* esclude ampiamente che altri microbi riescano a colonizzare lo stomaco. Paradossalmente a causa del suo considerevole adattamento agli esseri umani e della sua progressiva scomparsa durante il XX secolo, *H. pylori* potrebbe diventare un organismo modello per studiare la microecologia umana.

Quando gli scienziati saranno riusciti a classificare la miriade di ceppi di *H. pylori* e avranno scoperto in che modo ciascuno di essi influenza le cellule ospiti dello stomaco, le loro ricerche potranno fornire ai clinici un nuovo e completo arsenale per combattere le malattie del tratto digestivo.

In futuro, i medici potrebbero riuscire ad analizzare il DNA di un paziente per determinare la sua sensibilità nei confronti di un'infiammazione e il rischio genetico di ammalarsi di diversi tipologie tumorali. In un secondo momento, il medico potrebbe determinare la migliore combinazione di ceppi di *H. pylori* per il paziente e introdurre i microbi nel suo stomaco. Inoltre, i ricercatori potrebbero essere in grado di applicare le loro conoscenze su *H. pylori* per risolvere altri problemi medici. Proprio come accade con la neurotossina botox prodotta dal *Clostridium botulinum*, il batterio che provoca il botulismo, che attualmente viene impiegata in chirurgia cosmetica, anche la tossina VacA potrebbe diventare il punto di partenza per una nuova classe di farmaci capaci di sopprimere la funzione immunitaria.

Lo studio di questi nostri vecchi compagni batterici apre nuovi orizzonti per comprendere il nostro corpo, e promette di ampliare quelli della microbiologia medica. LS

PER APPROFONDIRE

BLASER M.J. e KIRSCHNER D., *Dynamics of Helicobacter pylori Colonization in Relation to the Host Response,* in «PNAS», vol. 96, n. 15, pp. 8359-8364, luglio 1999.

FALUSH D., WIRTH T., LINZ B., PRITCHARD J.K., STEPHENS M., KIDD M., BLASER M.J., GRAHAM D.Y., VACHER S., PEREZ-PEREZ G.I., YAMAOKA Y., MÉGRAUD F., OTTO K., REICHARD U., KATZOWITSCH E., WANG X., ACHTMAN M. e SUERBAUM S., *Traces of Human Migrations in Helicobacter pylori Populations*, in «Science», vol. 299, pp. 1582-1585, marzo 2003.

BLASER M.J. e ATHERTON J.C., *Helicobacter pylori Persistence: Biology and Disease*, in «Journal of Clinical Investigation, vol. 113, n. 3, pp. 321-333, febbraio 2004.»

Archivio Alinari; le altre foto dell'articolo sono cortesia degli autori

Ippolito e il nucleare italiano

La complessa vicenda economica, politica e personale che ha segnato il futuro delle scelte energetiche in Italia

di Giovanni Paoloni

"Quando in Italia l'opinione pubblica qualificata cominciava a parlare di energia nucleare, io stavo facendo il concorso universitario. Accadde che Antonio Cavinato, che era professore di giacimenti minerari a Torino e senatore del PSDI, pubblicò un articolo su "Industria mineraria", dicendo che in Italia non poteva esserci uranio. Questa era una fesseria, e io la ribattei violentemente». Così, in un'intervista del 1992, Felice Ippolito iniziava il racconto dei suoi primi approcci al problema del nucleare italiano. Lo sviluppo di questo settore energetico in Italia lo avrebbe visto in un ruolo di primissimo piano, se non addirittura di protagonista assoluto, fino alla metà degli anni sessanta. L'avrebbe impegnato in battaglie politiche e civili, come la questione della nazionalizzazione elettrica e dell'indipendenza energetica nazionale. L'avrebbe posto a fianco delle punte più avanzate della ricerca scientifica in Italia, nella fisica come nella genetica. E alla fine l'avrebbe portato in tribunale, e poi addirittura in carcere.

Ma il futuro segretario generale del CNEN (Comitato nazionale per l'energia nucleare, poi divenuto ENEA) iniziò a occuparsi del nucleare come geologo: «Avevo studiato la geologia dell'Italia, e mi ero convinto che l'uranio – non in grandi quantità perché si tratta di un elemento ubiquitario, presente in piccole quantità un po' dovunque – poteva esserci in percentuali interessanti. Mi misi quindi a studiare la radioattività delle lave vesuviane e di altre rocce. Per fare questo lavoro, entrai in contatto con Edoardo Amaldi, che mi mise a disposizione alcuni contatori Geiger per eseguire ricerche sul terreno». Da cosa nasce cosa: «Amaldi mi mise anche in contatto con Giuseppe Bolla, direttore del CISE, il quale, dopo avermi incontrato, mi aiutò per le ricerche di uranio in Italia».

Negli anni dell'immediato dopoguerra, il CISE (Centro informazioni studi esperienze) era il solo punto di riferimento per chi in Italia volesse occuparsi di energia nucleare. Era stato costituito a Milano nel 1946 per iniziativa di Giuseppe Bolla, professore ordinario di fisica superiore, e di tre giovani ricercatori: i fisici Carlo Salvetti e Giorgio Salvini, e l'ingegnere della Edison Mario Silvestri. Giuridicamente, era una società a responsabilità limitata, cui aderivano varie industrie interessate allo sviluppo della nuova fonte di energia. Soprattutto industrie private, come la Edison, la Cogne e la Fiat, ma anche pubbliche, come la Terni, che era di proprietà dell'IRI, e l'Azienda elettrica milanese, sia pure in posizione minoritaria. Presidente del CISE era Vittorio De Biasi, amministratore delegato della Edison; del consiglio d'amministrazione faceva parte Vittorio Valletta, amministratore delegato della Fiat, mentre la ricerca pubblica era rappresentata dal presidente del Consiglio nazionale delle ricerche, Gustavo Colonnetti.

L'obiettivo del Centro era studiare le condizioni di realizzazione di un reattore nucleare e tentarne poi la costruzione. E per la fine del 1951, malgrado disponesse di finanziamenti molto esigui, aveva raggiunto alcuni importanti risultati. I suoi ricercatori avevano realizzato un impianto pilota per la produzione di acqua pesante mediante elettrolisi e un impianto sperimentale per la metallurgia dell'uranio; avevano effettuato importanti misure sulla fissione dell'uranio e messo a punto un'attrezzatura elettronica di prim'ordine. Fin dalla fondazione, poi, il CISE era dotato di una ricca biblioteca specializzata e di un servizio di documentazione scientifica. Ma il risultato forse più significativo era la formazione di personale qualificato: nei laboratori del CISE si formarono infatti molti di coloro che negli anni successivi avrebbero svolto ruoli importanti nel nucleare italiano.

Il CISE costituiva però solo un primo passo sulla strada del nucleare italiano: all'appello mancava il mondo politico. E non a caso. Negli stessi anni divampava infatti il dibattito sulla nazionalizzazione dell'industria elettrica, alla quale gli industriali privati del settore (fra cui alcuni promotori del CISE) si opponevano fieramente, e che riguardava direttamente lo sviluppo del settore nucleare. Chi avrebbe pesato di più nel nucleare italiano: lo Stato o gli industriali elettrici? Quale ruolo avrebbe dovuto avere il nucleare nello sviluppo del sistema elettrico italiano? E infine: il nucleare sarebbe stato o no il cavallo di Troia della nazionalizzazione elettrica?

All'insegna del compromesso

L'intervento del Governo sulla questione nucleare era stato sollecitato sia dagli industriali, che speravano soprattutto in un sostanzioso finanziamento pubblico alle attività del CISE, sia dai fisici, che si auguravano che un sostegno adeguato al settore nucleare facesse da volano a un maggiore sviluppo e a una diversa organizzazione della ricerca scientifica in Italia. Dopo qualche tentativo andato a vuoto, a dimostrare attenzione concreta per l'argomento fu, nel 1952, il nuovo ministro dell'Industria del settimo governo De Gasperi, Pietro Campilli. Contattato da Francesco Giordani, ex presidente dell'IRI e del CNR, e rappresentante italiano presso la Banca Mondiale dopo il 1945, Campilli (che dal canto suo era stato promotore della costituzione della Finelettrica, la finanziaria IRI in cui erano state concentrate le quote di partecipazione pubblica nell'industria elettrica) si accordò col nuovo ministro della Pubblica Istruzione Antonio Segni, e insieme ottennero da De Gasperi il varo del decreto costitutivo del Comitato nazionale per le ricerche nucleari (CNRN).

Fu una scelta segnata dal compromesso politico; la struttura pubblica chiamata a occuparsi del nucleare non era un ente, quindi non aveva personalità giuridica, né poteva avere un patrimonio. Inoltre, coloro che vennero chiamati a reggerla erano profondamente divisi sulla questione centrale della nazionalizzazione dell'industria elettrica. A presiedere il Comitato fu nominato lo stesso Giordani, ed entrarono a farne parte Modesto Panetti (docente del Politecnico di Torino, presidente del Comitato nazionale per l'ingegneria e l'architettura del CNR, senatore democristiano), Edoardo Amaldi, Enrico Medi (fisico e deputato democristiano), Aldo Silvestri-Amari, Felice Ippolito, Bruno Ferretti. Come «esperti industriali» entrarono Arnaldo M. Angelini, vicepresidente della Finelettrica, e Vittorio De Biasi, amministratore delegato della Edison.

Nazionalizzazione elettrica e sviluppo nucleare erano questioni strettamente legate tra loro

In sintesi/*Energia, tra ricerca e politica*

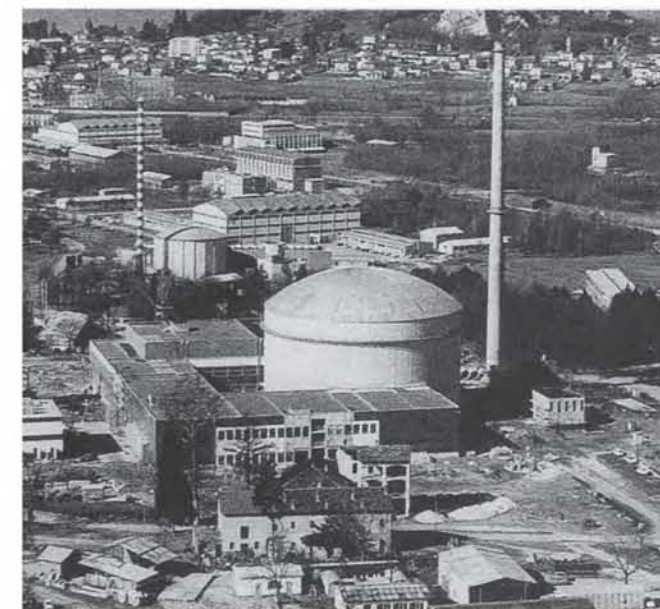
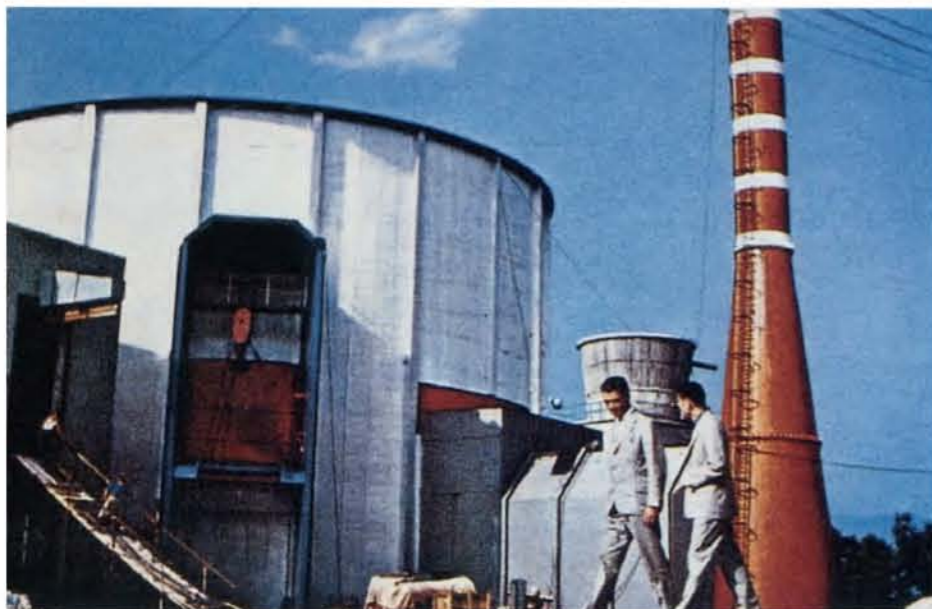
- Le origini dello sviluppo dell'energia nucleare in Italia sono direttamente collegate con il dibattito intorno alla nazionalizzazione dell'industria elettrica che dominava la scena politica negli anni cinquanta e sessanta.
- Il Comitato nazionale per le ricerche nucleari (CNRN), di cui fu nominato segretario Felice Ippolito, nacque all'insegna del compromesso politico, senza personalità giuridica e con fondi insufficienti, ma riuscì ad acquisire un ruolo di primo piano nello sviluppo del nuovo settore energetico, difendendo la centralità dell'intervento statale.
- Oltre a occuparsi di nucleare, il CNRN, e successivamente il CNEN, contribuirono in misura determinante alla ripresa di vari settori della ricerca scientifica italiana del dopoguerra.
- Nel 1963 una campagna di stampa ben orchestrata fece scoppiare il «caso Ippolito», che sfociò in un processo, e poi una condanna, che avrebbero avuto un'influenza cruciale, e permanente, sulle politiche energetiche in Italia.

NUCLEARE DI PACE. Il nuovo clima internazionale ebbe ripercussioni importanti sul nucleare in Italia. A fianco, nel corso della seconda conferenza di Ginevra sugli usi pacifici del nucleare (agosto 1958), Ippolito riceve nello stand italiano il segretario generale dell'ONU, Dag Hammarskjoeld (*a sinistra*) e il presidente della conferenza Francis Perrin (*al centro*).

Prosegue il racconto di Ippolito: «Quando si costituì il CNRN ero già fra i geologi italiani lo specialista di geologia dell'uranio. Perciò venni designato come uno dei due esperti nominati dal Ministro dell'Industria; l'altro era il direttore generale delle fonti energetiche, Aldo Silvestri-Amari. Nel CNRN si cercava infatti di raccogliere competenze diverse e di creare una struttura interdisciplinare. Per combinazione ero anche il più giovane: sicché alla domanda "Chi fa il segretario?", si disse, come è tradizione: il più giovane, che è Ippolito. Così per i primi quattro anni sono stato il segretario del CNRN e firmavo le lettere come segretario del Comitato».

L'articolo 2 del decreto istitutivo del CNRN ne stabiliva così i compiti: «1. effettuare studi, ricerche e sperimentazioni nel campo della fisica nucleare; 2. promuovere ed incoraggiare lo sviluppo delle applicazioni industriali dell'energia nucleare; 3. mantenere i rapporti e sviluppare la collaborazione con le organizzazioni internazionali e con gli enti stranieri che operano nel campo degli studi nucleari». Per i compiti di ricerca fondamentale, il Comitato avrebbe dovuto avvalersi dell'Istituto nazionale di fisica nucleare, istituito nel 1951, mentre per la ricerca applicata la scelta naturale ricadeva sul CISE.

In realtà, nelle intenzioni di alcuni dei suoi promotori, il CNRN avrebbe dovuto divenire un semplice organismo dispensatore di finanziamenti, con un ruolo di coordinamento puramente amministrativo. Sembrava pensarla così, per esempio, il presidente del CNR Colonnetti. Fu presto chiaro, però, che il CNRN aveva una concezione diversa del proprio ruolo e delle proprie funzioni: in effetti, negli anni che seguirono, rappresentò un esempio insolito, e nuovo per l'Italia, di gestione estremamente dinamica dell'attività di ricerca. In conseguenza dei compromessi che ne accompagnarono la nascita, gli erano stati affidati compiti vasti, ma senza la necessaria autonomia giuridica, e con scarse risorse. La definizione del suo ruolo era quindi lasciata all'intraprendenza degli uomini che lo guidavano: che tuttavia, come è stato detto, erano divisi su questioni di fondo. La maggioranza dei membri del Comitato, tra cui Ippolito e Amaldi, era favorevole sia alla nazionalizzazione dell'industria elettrica sia a un forte controllo statale sul settore nucleare. Di parere completamente opposto era invece la Edison, la maggiore industria privata del settore elettrico: il cui amministratore delegato, De Biasi, era sia presidente del CISE che membro del CNRN. Né l'iniziativa privata, né il successivo intervento pubblico potevano dunque dirsi adeguati ai problemi di un effettivo avvio dell'energia nucleare in Italia: non lo sarebbero stati neppure se avessero cooperato, ma, oltre tutto, cominciarono presto a ostacolarsi a vicenda.

La prima riunione del Comitato destinata alle scelte operative si svolse 23 luglio 1952 e fu dedicata a decidere come distribuire il miliardo di finanziamento disponibile: fu concordato di destinare 600 milioni al CISE e 200 all'INFN, che li userà per avviare i lavori dei laboratori di Frascati, e di accantonare 100 milioni per gli impegni internazionali (la partecipazione al costituendo CERN) e altri 100 per il funzionamento del Comitato e le ricerche minerarie (le due cose di cui era direttamente responsabile Ippolito). Appena due mesi dopo, nella sua seconda riunione,

Le ricerche **pagate dallo Stato** non dovevano essere **patrimonio esclusivo dei privati**

IL REATTORE DI ISPRA. Nel 1955 fu deciso di acquistare negli Stati Uniti un reattore del tipo CP-5 a uranio arricchito e acqua pesante, da adattare alle esigenze degli scienziati italiani. Il reattore entrò in fase di criticità nel marzo del 1959 e il Centro di ricerche nucleari di Ispra, in provincia di Varese, fu inaugurato il 13 aprile dello stesso anno. In seguito, il Centro sarebbe stato ceduto all'EURATOM. Sopra, da sinistra a destra: il reattore di Ispra, il presidente della Repubblica Giovanni Gronchi durante l'inaugurazione e una veduta dall'alto di Ispra con l'edificio del reattore al centro. Qui sotto: Amintore Fanfani e Giovanni Gronchi ai funerali di Enrico Mattei, scomparso in un misterioso incidente aereo il 27 ottobre 1962.

il CNRN si ritrovava già a discutere dell'eccessiva vaghezza dei programmi di ricerca presentati dal CISE, e soprattutto della necessità di sviluppare i rapporti tra CNRN e CISE in modo da evitare che i risultati acquisiti da quest'ultimo col finanziamento statale rimanessero patrimonio esclusivo dei gruppi privati che nel CISE avevano la maggioranza.

La soluzione dei problemi venne individuata nella trasformazione del CISE in società paritetica tra pubblico e privato, che però si concretizzò solo nel 1955, e dopo forti contrasti. Nel 1958, tracciando un bilancio dei primi anni di attività del Comitato, Felice Ippolito ricordava: «I tecnici del CISE ebbero incarico dal Comitato di iniziare gli studi relativi alla progettazione di un reattore di ricerca. Nell'aprile 1954 essi presentarono al CNRN il progetto preliminare di un reattore a uranio naturale e acqua pesante destinato a raggiungere un livello di potenza di 10.000 chilowatt. Per la costruzione di un reattore in Italia erano peraltro necessari studi relativi alla produzione di uranio metallico e di acqua pesante, e di altri materiali da usare nelle strutture».

Il nucleare ai tempi della Guerra Fredda

Nel frattempo il clima internazionale relativo alle applicazioni pacifiche del nucleare stava cambiando: l'esplosione della prima bomba atomica sovietica nel 1949 aveva provocato una corsa verso armi atomiche ancora più distruttive e un inasprimento del segreto nucleare. Ma l'esplosione termonucleare sovietica dell'estate 1953 dimostrò che il segreto assoluto non era risolutivo, e provocò uno choc psicologico sufficiente a far crollare l'isolazionismo atomico americano, e a sostituirlo con un nuovo tipo di iniziativa politica. Dopo essersi consultato con gli inglesi, l'8 dicembre 1953 Eisenhower si rivolse all'Assemblea generale delle Nazioni Unite. Descrisse l'equilibrio del terrore derivante dall'esistenza di bombe atomiche 25 volte più potenti di quella di Hiroshima, e lanciò una proposta divenuta celebre col nome «Atomi per la pace»: chiedeva che le potenze produttrici di uranio e sostanze fissili mettessero parte di questi materiali a disposizione delle Nazioni Unite, le quali avrebbero dovuto garantirne un uso pacifico e rivolto all'interesse generale. Alla fine del 1954, l'Unione Sovietica propose una conferenza internazionale di esperti: la conferenza dell'ONU sul nucleare pacifico venne infine convocata a Ginevra per il 1955.

Il nuovo clima internazionale ebbe conseguenze importanti per la politica nucleare italiana, come riferisce sempre Ippolito: «In vista di questa nuova situazione, fu deciso dal Comitato l'invio negli Stati Uniti d'America, nella primavera del 1955, di una missione, diretta dal presidente Giordani, nel corso della quale si prospettò la possibilità di acquistare negli USA non solo quei materiali di cui, come si è detto, era stata studiata un'eventuale produzione nazionale, ma anche reattori nucleari del tipo più progredito. Un accordo in questo senso avrebbe permesso di guadagnare anni preziosi nell'attuazione di un programma italiano di ricerche, ferma restando naturalmente l'utilità degli studi eseguiti in vista di un futuro sviluppo autonomo della costruzione dei reattori e della preparazione dei materiali speciali [...] L'accordo tra il governo italiano e quello degli Stati Uniti fu firmato a Washington il 28 luglio 1955. [...] Dopo una serie di contatti con le industrie USA, la missione decise l'acquisto dalla American Car & Foundry di un reattore del tipo CP-5 a uranio arricchito e acqua pesante, il cui prototipo aveva già dato ottimi risultati nel Laboratorio Nazionale di Argonne, presso Chicago. [...] Furono intanto compiuti studi per la scelta di una località adatta alla creazione di un Centro di Ricerche Nucleari che potesse ospitare il reattore e i laboratori annessi. Tali studi tenevano conto di una futura espansione del Centro per l'eventuale installazione di altri reattori. La scelta del terreno per il Centro venne affidata al CISE, che aveva anche l'incarico di seguire la progettazione del reattore CP-5. A seguito delle ricerche effettuate fu scelto un terreno nel Comune di Ispra, vicino Varese, sulla riva orientale del Lago Maggiore».

Il cambiamento rispetto alla strategia del reattore «nazionale» era radicale, e nel CISE non tutti ne furono soddisfatti. Inoltre, anche se l'incarico di seguire la costruzione del Centro di Ispra e del reattore era stata affidata al CISE, il CNRN era sempre più portato a intervenire sull'argomento, e quindi nella vita interna del CISE. I rapporti tra i due enti divennero via via più difficili e tesi, fino alla decisione del CNRN di condurre in proprio la realizzazione del Centro, determinando una traumatica rottura, che si consumò nel settembre 1957. Il CISE, privato di una parte dei suoi tecnici e del suo obiettivo principale, si trovò a dover riorientare il suo programma di attività, mentre il CNRN assumeva in modo definitivo una posizione dominante nel nucleare civile italiano.

Frattanto, nel luglio del 1955, era scaduto il primo mandato del CNRN. Il Comitato aveva continuato a essere operativo, prendendo, come si è visto, decisioni importanti, ma il rinnovo tardava ad arrivare, e con esso il potenziamento finanziario e organizzativo indispensabile per realizzarne i programmi. Il 12 luglio 1956, con l'intento di sollecitare decisioni politiche, Giordani si dimise dalla presidenza del Comitato. E, per solidarietà, si dimisero anche tutti gli altri. Il ministro dell'Industria, Emilio Colombo, preoccupato dalla possibile interruzione delle attività, delegò «il segretario generale prof. Felice Ippolito, a provvedere all'ordinaria amministrazione e all'adempimento delle decisioni finora adottate».

«Fu così che assunsi un ruolo giuridicamente non valido, di capo

GESTIRE LA RICERCA PUBBLICA. Tra il 1956 e il 1963 Ippolito, e gli enti di cui fu responsabile, ebbero un ruolo determinante nello sviluppo della ricerca italiana, contribuendo tra l'altro, oltre all'installazione del reattore di Ispra, alla realizzazione del sincrotrone nei laboratori dell'INFN di Frascati, alla nascita del centro di ricerche della Casaccia e del laboratorio internazionale di genetica e biofisica di Adriano Buzzati Traverso a Napoli. Sopra, da sinistra a destra: catena di scatole a guanti per la manipolazione di materiali radioattivi al Centro di studi nucleari della Casaccia; il ministro dell'Industria Emilio Colombo in visita allo stand del CNEN alla Fiera del Levante di Bari del 1962; stoccaggio di elementi di combustibile nel centro CNEN di Saluggia.

«Mi comportai come Mattei. Invece di liquidare le poche attività, **mi scatenai»**

esecutivo di un ente che ancora non esisteva», racconterà anni dopo Ippolito alla giornalista Eleonora Puntillo. «Rimasto solo [...] mi comportai come Enrico Mattei. Invece di licenziare quel poco di personale e liquidare le poche attività, come speravano quelli del CISE e tutti gli industriali elettrici, io mi scatenai. Provocai una violentissima campagna di stampa contro il Governo che faceva mancare i denari a un organismo scientifico statale, e così facendo lasciava spazio alle industrie elettriche private.»

Il 20 luglio, il presidente del Consiglio Antonio Segni riceveva una delegazione del CNRN composta da Amaldi, Angelini, Ferretti e Ippolito. Che cosa avessero chiesto a Segni, lo raccontò Ippolito all'ANSA il giorno dopo: «Si attende almeno un decreto che rinomini un nuovo Comitato e un nuovo presidente. È necessario che in Italia si spenda almeno il 20 per cento di quello che si spende in Francia: il che significherebbe spendere sull'ordine dei 20-22 miliardi all'anno. D'altra parte se si vuole che il nostro paese tenga degnamente il suo posto nelle organizzazioni atomiche mondiali in corso di creazione, è indispensabile che i nostri tecnici e i nostri fisici abbiano gli indispensabili mezzi».

La risposta non si fece attendere troppo. Il 24 agosto 1956, un nuovo decreto rinnovò il CNRN, nominandone presidente il senatore DC Basilio Focaccia. Il Comitato non ottenne personalità giuridica, ma il provvedimento avviò comunque una forte crescita organizzativa dell'ente, di cui Ippolito, ormai correntemente indicato come "segretario generale" del CNRN, fu il motore principale. Iniziava così una nuova fase della politica nucleare italiana, ancor più fortemente marcata dalla personalità di Felice Ippolito.

Le tre centrali italiane

La prima a muoversi per la costruzione in Italia di una centrale nucleare fu la Edison, che coinvolse altre aziende elettriche, pubbliche e private, e società manifatturiere dell'Italia centro-settentrionale, costituendo con esse la SELNI, nel dicembre 1955. L'iniziativa camminava però con estrema lentezza, sia per le ostilità di natura politica di chi, come Ippolito e il CNRN, pensava che lo Stato dovesse avere un totale controllo del nucleare, sia per questioni tecnico-giuridiche obiettive, legate all'assenza di una normativa adeguata sul settore nucleare.

Nel giugno 1957, il CNRN, su richiesta del Ministero dell'Industria, espresse parere favorevole all'iniziativa Edison, ma subordinando ogni deliberazione definitiva alla presentazione da parte dell'azienda di un rapporto sulla sicurezza e di uno studio sull'ubicazione della centrale. Su quest'ultimo punto le decisioni si trascinarono poi ancora a lungo: solo nel 1960 si sarebbe avuta la definitiva localizzazione della centrale, con la scelta di Trino Vercellese.

Nuovi ostacoli al progetto Edison vennero nell'inverno 1957-1958 dal fronte finanziario: alla SELNI era stato accordato un finanziamento di 34 milioni di dollari dalla Export-Import Bank; per ridurre i rischi finanziari dell'operazione venne richiesta al Governo italiano una garanzia di cambio, vale a dire l'impegno a far fronte a eventuali maggiori costi nella restituzione del finanziamento, dovuti a peggioramenti del cambio. Il ministro dell'Industria, il liberale Guido Cortese, negò il proprio consenso, facendo fallire l'operazione: questa decisione era conseguenza delle pressioni esercitate da Ippolito e dal Comitato. La Edison subì un danno importante, e De Biasi reagì con veemenza, giungendo a chiedere al presidente del Consiglio dei Ministri la destituzione di Ippolito. Il progetto per la centrale, comunque, andò avanti.

Intanto, nell'aprile 1956, in seguito a una serie di ristrutturazioni dell'assetto azionario della SELNI, si era avuta una separazione tra i gruppi privati e le aziende pubbliche facenti capo alla Finelettrica (IRI). Queste ultime avevano costituito la Società elettro nucleare nazionale (SENN), con l'intenzione di costruire una centrale nucleare nel Sud: la scelta della località cadde sulla provincia di Latina.

Poco dopo anche l'ENI, con la costituzione della Società ita-

CORSI E RICORSI. Nell'estate 1963 fu Giuseppe Saragat a dare il via alla campagna stampa contro Ippolito, di cui poi avrebbe firmato la grazia, come presidente della Repubblica, nel 1968. Sopra, da sinistra: Giuseppe Saragat; Ippolito con Colombo e Fanfani alla Fiera di Milano del 1962; Ippolito al Parlamento Europeo, dove fu eletto nel 1979 e nel 1984 nelle liste del PCI.

liana meridionale per l'energia atomica (SIMEA), manifestò pubblicamente l'intenzione di impegnarsi nella costruzione di una centrale nucleare, sempre nell'Italia meridionale. Nell'inverno 1956-1957, la Banca internazionale per la ricostruzione e lo sviluppo (BIRS) propose al Governo italiano di affrontare assieme lo studio per una centrale elettronucleare: l'accordo relativo venne firmato il 27 luglio 1957. Era prevista l'erogazione al Governo italiano, tramite la Cassa del Mezzogiorno, di un prestito della stessa BIRS; la banca e il Governo stabilivano una serie di procedure per garantirsi la scelta della migliore offerta tra i possibili fornitori. La responsabilità esecutiva era affidata a un Comitato direttivo composto da Corbin Allardice, esperto nucleare in rappresentanza della BIRS, e da Ippolito, in rappresentanza del Governo italiano. La realizzazione del progetto (denominato Progetto ENSI, Energia nucleare Sud Italia) venne affidata alla SENN. La centrale avrebbe avuto la potenza di 160 megawatt, e sarebbe stata realizzata a Punta Fiume, alla foce del Garigliano.

L'avvio della costruzione delle tre centrali nucleari italiane ebbe un'eco in prevalenza favorevole nei mezzi di informazione e nell'opinione pubblica. Essendo l'argomento strettamente connesso a quello della politica elettrica, peraltro, le polemiche erano inevitabili. Le critiche si appuntavano soprattutto sull'entità dell'investimento necessario per la realizzazione delle centrali e sul maggior costo dell'energia elettrica di fonte nucleare, sulla localizzazione delle centrali di proprietà pubblica (collocate entrambe nel Mezzogiorno e troppo vicine fra loro), sulla mancanza di normative e controlli adeguati per il settore elettronucleare (questa era la critica mossa dai fautori della nazionalizzazione elettrica alla centrale Edison), sullo scarso coordinamento fra le varie iniziative. L'opinione pubblica non riusciva invece ad appassionarsi per altri argomenti di controversia, relativi ai problemi strettamente tecnici connessi alla scelta fra le varie filiere (la centrale di Latina utilizzava un reattore a grafite e uranio naturale; quella del Garigliano ad acqua bollente e uranio arricchito, e quella di Trino Vercellese il reattore ad acqua in pressione e uranio arricchito), dei quali l'unico che riscosse qualche successo fu la scelta fra uranio naturale e uranio arricchito, inopinatamente investita di valenze ideologiche.

A stretto rigore nessuna delle critiche, sull'uno e sull'altro fronte, può pregiudizialmente essere respinta come infondata. Per tutte, comunque, i diretti interessati erano in grado di fornire risposte convinte, se non convincenti. A quarant'anni di distanza, oltre tutto, il dibattito sul nucleare si è così complicato che i tentativi di valutare le scelte di allora sono fonte, se possibile, di dissensi ancora maggiori. Se vengono viste alla luce del dibattito sulla nazionalizzazione, infine, quelle polemiche appaiono chiaramente strumentali, come del resto la scelta di costruire centrali nucleari in un momento nel quale né la tecnologia di tali impianti né la loro economicità potevano dirsi provate è indubbiamente legata a ragioni politiche più che a valutazioni economiche.

Altri sono allora, a parere di chi scrive, i dati di fatto importanti: ancorché scarsamente coordinate fra loro, le iniziative industriali per la costruzione delle centrali erano orientate, dal punto di vista tecnico, in maniera da fornire il nostro paese di esperienze e dati di fatto sulle tre principali filiere commerciali. Forse aveva ragione chi sosteneva che i costi affrontati avrebbero potuto essere minori, ma essi apparivano comunque giustificabili alla luce dell'opzione nucleare. Assai più difficile da giustificare appare invece il fatto che le tre centrali siano state storicamente non un avvio (come era nelle intenzioni e negli auspici di chi le aveva incoraggiate e promosse) bensì il più importante sforzo nucleare italiano; se non dal punto di vista finanziario, certo da quello delle realizzazioni concrete. Ed è questo il nodo centrale, a parere di chi scrive, nella storia del nucleare italiano.

Nel 1964 l'Italia era **il terzo paese occidentale** per potenza elettronucleare in esercizio

La nascita del CNEN

Fin dalla sua istituzione, il CNRN aveva posto fra i propri obiettivi il varo di una legislazione organica per il settore nucleare, che da un lato regolasse i complessi e delicati aspetti tecnici della materia, dall'altro trasformasse il Comitato in un ente nucleare paragonabile a quelli degli altri paesi industriali, conferendogli personalità giuridica e dotandolo di un proprio bilancio. Il varo di questi provvedimenti incontrava però una diffusa ostilità, dettata da timori connessi al dibattito sulla nazionalizzazione elettrica. Nei suoi primi anni, il CNRN aveva ottenuto dal Governo il ritiro di un primo progetto di legge nucleare (progetto Caron) gradito agli elettroproduttori privati, sostituito con un altro progetto elaborato dal Comitato e appoggiato dal ministro dell'Industria Bruno Villabruna. La proposta Villabruna era stata ritirata dal governo Segni e alla fine del 1956, dopo molte incertezze, era stato varato un nuovo progetto, per opera del nuovo ministro, Guido Cortese: questa proposta non riusciva tuttavia ad avanzare verso l'approvazione parlamentare, e per evitare che il CNRN fosse soffocato dalla crisi finanziaria, vennero varate, nel 1957 e nel 1958, due leggi speciali di finanziamento.

Ottenere risorse certe nell'ambito di un quadro normativo più moderno rimaneva quindi l'obiettivo prioritario; abbandonata la proposta Cortese, il nuovo ministro dell'Industria Emilio Colombo elaborò un altro disegno di legge, anch'esso subito fermato da una diffusa ostilità parlamentare. Ulteriori dilazioni sembravano tuttavia impraticabili: il Comitato si era di fatto trasformato in un grosso ente di ricerca, dotato di un patrimonio tecnico-scientifico di prim'ordine, che amministrava ragguardevoli somme di denaro e aveva ormai 1700 dipendenti. Venne così effettuato un nuovo stralcio, che superò l'esame parlamentare e portò, nell'agosto 1960, all'istituzione del CNEN, che permetteva tra l'altro di sanare le situazioni amministrative anomale create per la realizzazione del Centro di Ispra, compito che passò al nuovo ente. Il CNEN era presieduto dal Ministro dell'Industria ed era retto da una Commissione direttiva; segretario generale veniva confermato Felice Ippolito.

La legge stralcio che aveva istituito il CNEN non era l'attesa legge complessiva sul nucleare; questa venne infatti varata soltanto dopo la nazionalizzazione elettrica e la costituzione dell'ENEL. Le due centrali di Latina e del Garigliano raggiunsero la criticità poco dopo la costituzione dell'ente elettrico, la prima il 27 dicembre 1962, la seconda il 5 giugno 1963, mentre quella di Trino Vercellese la raggiunse il 21 giugno 1964. L'inizio della produzione avvenne il 13 maggio 1963 a Latina, il 23 gennaio 1964 al Garigliano e il 22 ottobre 1964 a Trino: nell'insieme si trattava di una potenza di 642 megawatt, con una produzione che raggiunse nel 1965 i 3,5 miliardi di chilowattora, pari al 4,2 per cento della produzione totale di energia elettrica.

Quando si aprì la nuova conferenza di Ginevra, nel settembre 1964, l'Italia poteva presentarsi come il terzo paese occidentale per potenza elettronucleare in esercizio. Ma in quegli stessi mesi Felice Ippolito affrontava da detenuto un clamoroso processo.

Il «caso Ippolito»

Il «caso Ippolito» si era scatenato il 10 agosto 1963: mentre era in carica il governo «balneare» presieduto da Giovanni Leone, l'agenzia di stampa socialdemocratica pubblicò una nota di

Giuseppe Saragat: il leader del PSDI scriveva per difendere i vertici dell'ENEL (l'ente elettrico di Stato da poco costituito) dalle «indiscrezioni in chiave polemica» pubblicate da «L'Espresso» del 4 agosto e «dovute indubbiamente ad uno dei Consiglieri dell'ENEL sulla prima relazione del Direttore Generale Professore Angelini». Dopo varie lodi agli amministratori dell'ente elettrico (il direttore generale Arnaldo M. Angelini, già citato, e il presidente Vitantonio Di Cagno, un avvocato democristiano di Bari già presidente della SME, legato ad Aldo Moro), Saragat passava ad attaccare violentemente e «inspiegabilmente» (come noterà il 12 agosto l' «Avanti!», organo ufficiale del PSI) la gestione del CNEN. Saragat se la prendeva con «l'ossessione dell'energia atomica» e concludeva: «In quanto ai progetti che sentiamo nell'aria, di gettare altre centinaia di miliardi dalla finestra per costruire nuove centrali a combustibile atomico, ci proponiamo di vigilare per impedire nuovi assurdi sperperi di pubblico denaro». Nella settimana dal 10 al 17 agosto il leader del PSDI dedicò ben cinque note al CNEN, attaccando a fondo l'ente e il suo segretario generale Ippolito e dicendosi preoccupato dal fatto che quest'ultimo (che era anche consigliere d'amministrazione dell'ENEL) volesse trasferire nel nuovo ente elettrico il modello dell'ente nucleare.

Che Ippolito fosse il vero obiettivo degli attacchi di Saragat non era sfuggito agli addetti ai lavori sin dalla prima delle sue note, con le allusioni agli attacchi di un consigliere dell'ENEL (che poteva essere solo Ippolito) e con la difesa di Di Cagno e soprattutto di Angelini, i cui attriti con Ippolito risalivano al 1959, e i cui argomenti sull'antieconomicità delle centrali nucleari e sul ruolo dominante che l'ENEL avrebbe dovuto avere nel futuro del nucleare italiano costituivano l'asse portante degli interventi di Saragat. L'ultima nota, poi, si concludeva con una vera e propria minaccia: «Non è pensabile che al CNEN possano essere assegnati i 15 miliardi richiesti per il secondo piano quinquennale, prima di avere chiarito a fondo la situazione».

L'argomento, che non avrebbe dovuto essere tra i più appassionanti per l'opinione pubblica, fu ripreso l'11 agosto con risalto dal quotidiano confindustriale «24 Ore» e dal «Corriere della Sera», che costrinsero così i difensori del CNEN e di Ippolito a farsi vivi il giorno successivo su altri quotidiani («l'Unità», l' «Avanti!» e «La Voce Repubblicana»); l'unico quotidiano italiano che il 13 agosto riferì senza schierarsi fu il «Popolo», organo ufficiale della DC.

Gli industriali elettrici non fecero mistero di aver finanziato **la campagna contro Ippolito**

UN LUNGO PERCORSO LEGISLATIVO. Bruno Villabruna, ministro liberale dell'Industria tra il 1954 e il 1955, fu il primo a promuovere un disegno di legge destinato a regolamentare le ricerche nucleari in Italia. In realtà, la legge sarà promulgata solamente nel 1962, dopo la nazionalizzazione dell'energia elettrica e la nascita dell'ENEL.

Le note di Saragat diedero quindi esca a una violenta polemica giornalistica e politica che rapidamente si trasformò in una campagna di stampa contro Ippolito e il CNEN: il 18 agosto un altro esponente socialdemocratico, Luigi Preti, rinnovò l'attacco a Ippolito ponendo il problema della sua permanenza nelle cariche di segretario generale del CNEN e di consigliere d'amministrazione dell'ENEL. Il 20 agosto, intervistato da Piero Ottone, Saragat spiegò che la polemica sull'ente nucleare non era un tentativo di ingannare la noia del Ferragosto, ma un confronto fra due diverse concezioni del centro-sinistra: fra chi come lui voleva che si affrontassero i problemi concreti (sempre i soliti: casa, scuola, sanità, disoccupazione) e chi invece mirava «alla formazione di centri di potere per prendere in mano le leve di comando di tutta la vita nazionale» (si sarebbe tentati di ironizzare constatando che questi loschi gruppi di pressione, composti di illustri tecnocrati e ricercatori, avevano tra i loro referenti politici personalità come Lombardi e La Malfa).

Il 22 agosto il settimanale democristiano «Vita» dedicò la copertina alle critiche di Saragat, e due giorni dopo il presidente del Consiglio Leone incontrava il ministro dell'Industria (presidente di diritto del CNEN) Giuseppe Togni per esaminare la vicenda. Il 29 agosto «Vita» pubblicava con grande rilievo nuove indiscrezioni sul «dossier nucleare sul tavolo di Leone». Il dossier, secondo il settimanale, comprendeva i risultati di un'indagine sul CNEN svolta nel mese di luglio da un gruppo di senatori democristiani guidati da Giovanni Spagnolli, le note di Saragat, il programma futuro per il quale il CNEN attendeva una legge di finanziamento, un appunto della Corte dei Conti sull'incompatibilità fra le cariche ricoperte da Ippolito nel CNEN e nell'ENEL, e insinuazioni su affari poco puliti fra l'ente e una società in cui la famiglia Ippolito sarebbe stata interessata. Ed è su quest'ultimo aspetto che il fronte dei difensori si ruppe: dopo queste indiscrezioni molti cominciarono a prendere le distanze da Ippolito, distinguendo tra l'attività dell'ente nucleare e le sue eventuali responsabilità personali.

E il diretto interessato? Ippolito si era concesso, per la prima volta da anni, una vacanza; rientrato il 28 agosto, si fece vivo il 30, dichiarando che avrebbe tutelato la propria onorabilità nelle sedi competenti, che sul CNEN avrebbe sollecitato un'ampia indagine, e che si riservava se necessario di optare fra CNEN ed ENEL, rimanendo al CNEN. Il 31 agosto, però, Togni lo sospese dalle funzioni di segretario generale e nominò una commissione d'inchiesta ministeriale. Il 6 settembre il procuratore generale di Roma chiese di essere messo a conoscenza degli atti riguardanti Ippolito, citati in premessa nel decreto di sospensione pubblicato dalla «Gazzetta Ufficiale» e menzionati dai giornali; il 13 Ippolito si presentò spontaneamente al procuratore, che ascoltò la sua deposizione per ben quattro giorni. Il 17 settembre il Consiglio d'amministrazione dell'ENEL sottopose la questione dell'incompatibilità degli incarichi alle autorità tutorie dell'ente elettrico, che il 14 ottobre rimossero Ippolito.

Frattanto la vicenda giungeva in Parlamento, sotto forma di interpellanze e interrogazioni, e con una proposta (mai presa in considerazione dalle assemblee) di inchiesta parlamentare. In poche settimane Ippolito passò da potentissimo «Mattei nucleare» alla condizione di uomo in disgrazia, attaccato da chiunque pensasse di poter guadagnare qualcosa dalla sua debolezza. Con l'allontanamento di Ippolito dal CNEN e dall'ENEL sembravano raggiunti gli obiettivi di coloro che avevano fatto scoppiare il caso, vale a dire Saragat e gli industriali ex-elettrici, i quali non facevano mistero di aver sovvenzionato la campagna di stampa contro il segretario generale del CNEN.

Arresto, processo e condanna

Il 3 marzo 1964, dopo alcuni mesi di indagini, Ippolito venne arrestato, e poco dopo rinviato a giudizio. La conduzione del processo fu caratterizzata da un atteggiamento vessatorio del pubblico ministero, di cui le cronache registrano le intimidazioni verso i testimoni favorevoli a Ippolito, fino a suscitare critiche pesanti nella stampa estera e anche in quella italiana. Il processo si concluse con la condanna a undici anni di reclusione.

Tra i giuristi che criticarono l'operato della magistratura si trovano Galante Garrone e Jemolo, e le critiche furono così pesanti da indurre il procuratore generale a rispondere per difendere il proprio operato in occasione dell'inaugurazione dell'anno giudiziario. Successivamente la Corte d'appello operò una sostanziale revisione della condanna, riducendo drasticamente i reati attribuiti a Ippolito, riconosciuto colpevole soltanto di alcune irregolarità di lieve rilevanza penale.

Il processo fu seguito con grande attenzione dalla stampa: il fronte favorevole a Ippolito si polarizzò attorno alla stampa di sinistra, mentre quello avverso vide le testate di destra come protagoniste; i giornali politicamente non schierati mantennero (dopo una prima fase) un atteggiamento sostanzialmente neutrale, analogamente a quanto fatto dall'organo ufficiale della DC. La severità della sentenza fu comunque commentata negativamente, in particolare dal «Corriere della Sera».

La vicenda di Ippolito, intrecciandosi con quella di Domenico Marotta (si veda l'articolo *Caso Marotta: la scienza in tribunale*, di Giovanni Paoloni, in «Le Scienze» n. 431, luglio 2004), può essere considerata l'emblema di una crisi che investì, con gravissime conseguenze, l'intero sistema della ricerca in Italia. Ma le conseguenze più dirette del «caso Ippolito» riguardarono la politica energetica italiana: quando esso si scatenò, l'Italia era già alle prese con i postumi di un altro evento luttuoso, il «caso Mattei» (ottobre 1962), che aveva tolto di mezzo un altro protagonista del settore energetico e aveva messo in crisi un ente importantissimo per l'energia e per la ricerca, l'ENI.

Meno note sono le conseguenze che la crisi del settore nucleare seguita alla vicenda Ippolito ebbe su una parte importante del sistema industriale italiano. La nazionalizzazione elettrica e i programmi del CNEN avevano creato un clima di forte aspettativa tra gli addetti ai lavori, i quali prevedevano un rapido e massiccio sviluppo del nucleare italiano. Era una previsione sbagliata: negli oltre vent'anni trascorsi dal 1964 all'incidente di Chernobyl sarebbe entrata in esercizio la sola centrale di Caorso. Il CNEN fu esautorato da qualunque potere decisionale sulla costruzione di nuovi impianti nucleari, competenza questa passata all'ENEL.

Ma negli anni che seguirono l'allontanamento di Ippolito dal CNEN, l'ENEL realizzò una sola centrale (per l'appunto Caorso); la mancanza di commesse (nonostante gli annunci fatti a più riprese in occasione della crisi petrolifera del 1973) diede un grave colpo all'importante componente nucleare del settore elettromeccanico, provocando fra l'altro una crisi profonda dell'Ansaldo, il gruppo pubblico più esposto su quel fronte. Il tutto senza nessun beneficio per l'erario, che continuò a finanziare un'attività che nel frattempo incontrava un'ostilità sempre più marcata dell'opinione pubblica; frattanto altri paesi europei potenziavano la loro produzione elettronucleare fino a coprire con questa fonte una quota significativa del loro fabbisogno, e vendendo il surplus di elettricità all'Italia, perennemente deficitaria.

Ippolito uscì dal carcere nel 1968: aveva perso una posizione di grande potere, ma non aveva cambiato carattere né idee. Fondando la rivista «Le Scienze», il cui primo numero uscì a settembre di quell'anno, continuava la sua battaglia culturale e politica. LS

L'AUTORE

GIOVANNI PAOLONI è professore ordinario di archivistica generale all'Università della Tuscia a Viterbo. Si occupa di storia e archivi della politica scientifica e delle istituzioni di ricerca in Italia. Ha pubblicato, tra l'altro, con Raffaella Simili, *Per una storia del Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Laterza, 2001.

PER APPROFONDIRE

IPPOLITO F. e SIMEN F., *La questione energetica. Dieci anni perduti 1963-1973*, Feltrinelli, Milano, 1974.

PUNTILLO E., *Felice Ippolito, una vita per l'atomo*, Liguori, Napoli, 1987.

PAOLONI G. (*a cura*), *Energia, ambiente, innovazione: dal CNRN all'ENEA*, Laterza, Roma-Bari, 1992.

ZANINELLI S. (*a cura*), *Ricerca, innovazione, impresa. Storia del CISE 1946-1966*, Laterza, Roma-Bari, 1996.

CURLI B., *Il progetto nucleare italiano (1952-1964). Conversazioni con Felice Ippolito*, Rubbettino Editore, Soveria Mannelli, 2000.

BATTIMELLI G. (*a cura*), *L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Storia di una comunità di ricerca*, Laterza, Roma-Bari, 2001.

Le ultime scoperte sui condensati di Bose-Einstein, piccole nubi coerenti di atomi ultrafreddi, preparano una rivoluzione tecnologica che andrà dai computer agli aeroplani

Il sensore che viene dal freddo

di Jakob Reichel

Kenn Brown

Un secolo dopo essere stata concepita, la meccanica quantistica è ancora una teoria inquietante. In essa tutta la materia è pensata come onda, ma negli oggetti che ci circondano le onde di materia sono troppo piccole per essere osservate. Anche se le leggi quantistiche sono valide per oggetti di ogni dimensione – dalle particelle elementari all'universo nella sua totalità – nella vita di tutti i giorni non vediamo le onde di materia né qualunque altro comportamento quantistico. Per qualche sottile meccanismo ancora incompreso, la meccanica quantistica nasconde i suoi strani effetti quando molte particelle interagiscono in modo disordinato o quando la temperatura sale molto sopra lo zero assoluto. Come risultato, i fenomeni quantistici tendono a essere associati solo al mondo delle particelle elementari e ad astratti esperimenti mentali, come il famoso gatto di Schrödinger, che esiste in uno stato quantistico in cui è sia vivo sia morto.

RIFLESSI ATOMICI. Un chip atomico confina una nube di atomi di litio freddi sopra la sua superficie nel laboratorio di Jörg Schmiedmayer a Heidelberg. L'immagine della nube si riflette sulla superficie lucida.

I condensati di Bose-Einstein sono facili da osservare, **ma realizzarli è un'impresa** quasi scoraggiante

Recentemente, tuttavia, questo scenario ha cominciato a mutare. I fisici stanno imparando come conservare la bizzarria della meccanica quantistica a scale via via più grandi, osservandola in modi sempre più diretti. Un esempio particolarmente efficace di questa tendenza è la realizzazione, nel 1995, di un condensato di Bose-Einstein di atomi. In una struttura di questo tipo, centinaia di migliaia di atomi si dispongono nello stesso stato quantico. Le loro singole onde di materia diventano esattamente sovrapposte. Poiché la gigantesca onda di materia che ne risulta contiene così tanti atomi, è facile osservarla: una volta che si è ottenuto il condensato, basta una videocamera amatoriale o poco più per vedere che la materia ha una struttura ondulatoria!

Questa accessibilità senza precedenti alle onde di materia ha creato un boom di condensati di Bose-Einstein. Centinaia di ricercatori teorici e sperimentali, che sono soliti lavorare in diversi campi della fisica, hanno dedicato la loro attenzione alla nuova questione. Negli ultimi anni, gli studi sui condensati di Bose-Einstein hanno rivitalizzato gli esperimenti su effetti quantistici prima considerati molto remoti e inaccessibili alla pratica; rendendo quei fenomeni quantomeccanici, in un certo senso, più reali.

Ma anche se i condensati di Bose-Einstein sono facili da osservare, realizzarli è un'impresa quasi scoraggiante: la transizione di fase da un vapore atomico classico (non-quantistico) a uno condensato avviene a temperature estremamente basse – solitamente meno di un milionesimo di grado sopra lo zero assoluto. Per raggiungere questa temperatura, gli atomi devono essere isolati, sospesi nello spazio in una camera a vuoto da un campo magnetico e raffreddati grazie ai laser e a un'altra tecnica chiamata «raffreddamento per evaporazione» (*si veda il box a p. 89*). Il problema è che la minima interazione incontrollata con la temperatura dell'ambiente circostante distruggerebbe il fragile stato quantistico degli atomi. Così, nei circa 50 laboratori di ricerca attualmente in grado di produrre condensati di Bose-Einstein, le rarefatte nubi di atomi ultrafreddi di solito sono circondate da parecchie tonnellate di apparecchiature ad alta tecnologia. I componenti per il vuoto ultra-spinto, meticolosamente puliti, producono i livelli di vuoto migliori del mondo e proteggono gli atomi dalle violente collisioni che avvengono nei gas a temperatura ambiente.

In tutti questi esperimenti, la tecnica chiave è il confinamento magnetico, che consente di «intrappolare» atomi nello spazio vuoto con l'aiuto di campi magnetici. Il raffreddamento per evaporazione può funzionare solo in una trappola, e il confinamento magnetico è quello che funziona meglio con questa tecnica di raffreddamento. Inoltre, quanto più è intenso il confinamento (cioè quanto più strettamente gli atomi sono impacchettati in un piccolo volume), tanto più veloce ed efficiente è il raffreddamento. Per questo chi fa ricerca su questi condensati genere circonda le camere a vuoto con potenti, voluminosi elettromagneti. Per ottenere la più intensa compressione magnetica possibile, si sviluppano pesanti bobine raffreddate ad acqua, spesso costituite da robusti refrigeratori che consumano molti chilowatt. Progettare e far funzionare queste trappole magnetiche è una parte significativa degli esperimenti sui condensati di Bose-Einstein.

A causa di questa complessità sperimentale, molti trovano difficile immaginare che i condensati si possano usare in applicazioni concrete, come sensori di rotazione portatili che potrebbero permettere ad aeroplani e sottomarini di navigare con una precisione mai raggiunta finora. Ma la situazione è cambiata, grazie ad alcuni importanti progressi. In particolare, ora è possibile confinare, muovere e manipolare gli atomi con l'aiuto di microchip. Un laboratorio quantistico portatile come quello che sarebbe necessario per le applicazioni sui sensori non è più un sogno irrealizzabile, ma un obiettivo di ricerca molto concreto.

UN NASTRO TRASPORTATORE ATOMICO può posizionare in modo preciso un condensato di Bose-Einstein. Il nastro trasportatore è una struttura al centro del chip che produce una serie di pozzi magnetici la cui posizione dipende dalla fase della corrente nei cavi. La serie di immagini (*riquadro in viola*) è stata presa mentre il nastro trasportava il condensato a di 1,6 millimetri di distanza dalla superficie del chip. Dopo il trasporto, il condensato è stato lasciato in caduta libera. La forma che tende ad assumere è una caratteristica dei condensati di Bose-Einstein, e dimostra che questo fragile stato della materia è sopravvissuto al trasporto.

L'AUTORE

JAKOB REICHEL ha conseguito il Ph.D. all'Ecole Normale Supérieure (ENS) di Parigi. Nel 1997 si è trasferito al Max-Planck-Institut für Quantenoptik di Garching e all'Università di Monaco. Qui, con Ted Hänsch, ha messo in piedi un piccolo gruppo che ha sperimentato l'uso di metodi per la manipolazione di atomi freddi. Nel 2004 ha ricevuto il premio EURYI per giovani ricercatori ed è ritornato all'ENS di Parigi.

Paesaggio magnetico

Come fa un microchip a tenere e controllare una nube di atomi sospesi vicino alla sua superficie? Sfruttando il campo magnetico che crea naturalmente. Chip come quelli dei computer contengono infatti una complessa rete di migliaia di cavi microscopici e le correnti che fluiscono attraverso di essi producono un campo magnetico. Di solito nessuno se ne preoccupa, perché a distanza macroscopica dalla superficie del chip l'intensità del campo è trascurabile. Vicino ai cavi, però, il campo cresce in modo inversamente proporzionale alla distanza. Entro 100 micrometri dalla superficie del chip il campo forma la trappola magnetica che sospende la nube di atomi nel vuoto. Poiché gli atomi sono così vicini ai cavi, è sufficiente meno di un watt di potenza per produrre una trappola magnetica che potrebbe essere alimentata dalla batteria di un computer portatile. Un bel risultato, tenendo conto dei chilowatt necessari nelle trappole magnetiche tradizionali.

Meglio ancora, il confinamento è molto più potente di quello convenzionale, e può creare un condensato di Bose-Einstein in meno di un secondo (raramente le trappole a bobine ce la fanno in meno di mezzo minuto). Questo incremento di velocità è importante, perché gli esperimenti sui condensati devono essere ripetuti centinaia di volte per poter formare una buona statistica per una gamma di condizioni sperimentali. Ogni sessione richiede la creazione di un nuovo condensato, e perciò di una riserva di atomi da caricare, confinare e raffreddare da un punto molto sopra la temperatura ambiente fino allo zero assoluto. Fa una grande differenza anche per il sensore di rotazione, dove la velocità più alta si traduce direttamente in una maggiore precisione (poiché si riduce il rumore).

L'incremento di velocità semplifica l'apparato dei condensati di Bose-Einstein in modo drastico, perché il vuoto può avere una quantità di gas residuo 100 volte maggiore. Con un vuoto imperfetto il problema è che le particelle rimanenti

In sintesi/*Chip atomici*

- I fisici stanno imparando a preservare la stranezza della meccanica quantistica a grande scala, in modo da rendere i fenomeni più facili da osservare e da sfruttare per eventuali applicazioni. I condensati di Bose-Einstein sono uno di quei fenomeni in cui è evidente la natura ondulatoria della materia.
- I campi magnetici su un microchip possono mantenere sospesa una nube di atomi nel vuoto a una temperatura di poco superiore allo zero assoluto per creare un condensato di Bose-Einstein. Questi «chip atomici» sono più piccoli delle trappole magnetiche convenzionali, consumano un millesimo dell'energia, hanno un funzionamento più rapido e richiedono un vuoto meno spinto.
- I chip atomici potrebbero trovare applicazione in sensori ultraprecisi per aeroplani o per la navigazione marittima, oppure nella realizzazione di computer quantistici.

collidono con gli atomi confinati estraendoli dalla trappola magnetica e dunque impoverendo la nube. Quando il raffreddamento procede più velocemente, si può tollerare di avere queste particelle disperse nel sistema poiché comunque hanno meno tempo per fare danni. In pratica, la tecnologia del vuoto può essere molto più semplice: il vuoto per un chip di condensati di Bose-Einstein non deve essere più spinto di quello all'interno del tubo catodico di un televisore. Così, la miniaturizzazione della trappola magnetica consente anche quella di altre parti dell'apparato.

Nonostante questi vantaggi, sulle prime sembra una follia tentare di porre un condensato di Bose-Einstein – il più freddo oggetto dell'universo – a un centinaio di micrometri da una superficie a temperatura ambiente (quella del microchip). Questa superficie emette costantemente radiazione infrarossa, che può trasferire calore a qualunque cosa si trovi nelle vicinanze.

Chi metterebbe dei cubetti di ghiaccio vicino a un calorifero? La prima idea di trappola a chip, proposta nel 1995 da un gruppo di ricerca del California Institute of Technology, prevede il raffreddamento dell'intero chip a temperature vicine allo zero assoluto utilizzando un ingombrante e costoso refrigeratore a elio liquido. Cercando di mantenere l'affascinante semplicità dell'approccio a chip, nel 1997 il mio gruppo decise di lavorare a temperatura ambiente e di sperare per il meglio. Per fortuna le nubi di atomi ultrafreddi sono molto diverse dai cubetti di ghiaccio. Un oggetto solido, come un cubetto di ghiaccio, assorbe la radiazione termica in modo molto efficiente. Gli atomi di gas, invece, assorbono radiazione solo a lunghezze d'onda ben definite, così il gas assorbe in minima parte il calore irraggiato dal chip. Le interazioni termiche sono talmente deboli da essere trascurabili alla distanza di 100 micrometri, e non recano danno alla scala temporale di un esperimento condensati di Bose-Einstein.

Quando l'idea di una trappola a chip emerse per la prima volta, occorreva risolvere alcuni ardui problemi, perché il sogno diventasse realtà. Per prima cosa, ovviamente, bisognava progettare e realizzare concretamente un chip di confinamento. Capire come riuscirci è stata un'esperienza davvero gratificante. Sono sempre stato impressionato dagli incredibili progressi dell'industria microelettronica, che si trova di fronte a sfide sempre nuove ma riesce implacabilmente a vincerle, mantenendo lo stesso tasso di miniaturizzazione. Come fisico delle basse temperature, avevo solo una vaga idea delle tecnologie che stanno dietro a questi progressi. Ora ne sono coinvolto. Parlando con gli specialisti in questo campo e consultando libri e siti web, ho trovato qualcosa su dispositivi ibridi a film sottile, che depositano conduttori d'oro su piccoli chip di ceramica e possono essere utilizzati per il confinamento degli atomi.

Una volta imparato come costruire un chip di confinamento, i miei colleghi e io al Max-Planck-Institut für Quantenoptik di Garching e alla Ludwig-Maximilian-Universität di Monaco ci trovammo ad affrontare il problema di come far cadere gli atomi nella trappola. Sia che si usi un sistema convenzionale a bobina sia che si usi la tecnica a chip atomico, gli atomi devono essere raffreddati a una temperatura di qualche microkelvin in una trappola magneto-ottica (MOT) prima di poterli chiudere in una trappola puramente magnetica. Elemento essenziale di una MOT è una schiera di sei fasci laser che investono gli atomi dalle tre direzioni ortogonali e nei due versi per ogni direzione. Ma come si fa quando c'è di mezzo la superficie di un chip? Il chip blocca almeno uno dei fasci, e la MOT non può più funzionare.

La soluzione è avere un rivestimento a specchio sul chip che riflette due dei fasci (*si veda il box nella pagina a fronte*) Se i laser e i chip sono orientati nella giusta direzione, i fasci reindirizzati possono sostituire quelli bloccati e la MOT funziona, producendo una nube di atomi freddi proprio sopra la superficie del chip. Basta considerare pochi altri dettagli (come la polarizzazione dei fasci laser), e l'idea funziona: oggi i sistemi di questo tipo si dicono MOT a specchio, o MOT a superficie. Una volta che gli atomi sono preraffreddati nella MOT a specchio è facile caricarli nella trappola a chip: la MOT è spenta e la corrente nei cavi sul chip presente. Quando accade ciò, la maggior parte della nube atomica si trova nel campo magnetico del chip.

Nel 1998 lo studente laureato Wolfgang Hänsel, il mago dell'ottica quantistica Ted Hänsch e io abbiamo sfruttato questa tecnica per confinare e raffreddare atomi nella prima realizzazione di un chip atomico al Max-Planck-Institut. Molti ricercatori erano ancora scettici sul futuro della nuova tecnica per produrre i condensati di Bose-Einstein, per lo più perché la superficie del chip è così vicina agli atomi intrappolati. Nell'estate del 2001, con il gruppo di Claus Zimmermann dell'Università di Tubinga, in Germania, abbiamo provato che gli scettici erano in errore, e, in modo indipendente, abbiamo realizzato condensati di Bose-Einstein utilizzando trappole a microchip. Abbiamo cercato questo risultato per anni, e alla fine i nostri gruppi lo hanno ottenuto a pochi giorni l'uno dall'altro. Zimmermann (che è stato anche un collaboratore di Hänsch prima di spostarsi a Tubinga) ha definito questa circostanza «un *entanglement* di idee», riferendosi al noto fenomeno quantistico. Attualmente, più di una decina di laboratori in tutto il mondo usano chip atomici per gli esperimenti sui condensati di Bose-Einstein.

Per un chip atomico di base bastano due o tre cavi organizzati in un semplice circuito, per generare una trappola magnetica. Ma, grazie a un altro punto di forza di questa tecnica, si può fare molto di più. È possibile disporre i cavi secondo uno schema qualsiasi, disegnando linee curve, a zig zag o addirittura incrociate. Quando le correnti viaggiano in cavi disposti in questo modo, si produce un complesso «territorio magnetico» che gli atomi possono esplorare, aprendo fantastiche possibilità per la loro manipolazione.

Sembra **una follia** tentare di porre il più freddo oggetto dell'universo **a un centinaio di micrometri** di distanza da una superficie a temperatura ambiente

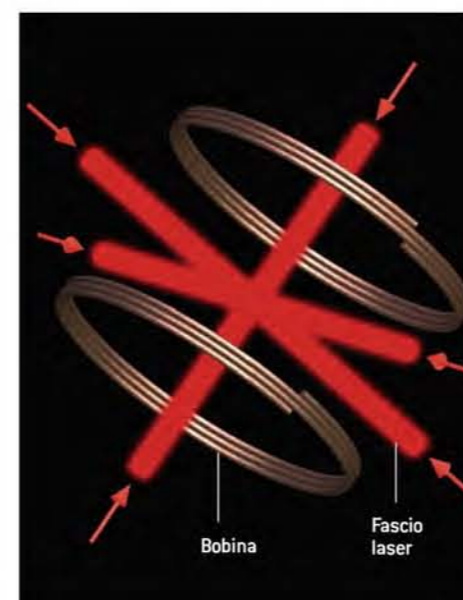
RAFFREDDARE UN GAS DI ATOMI

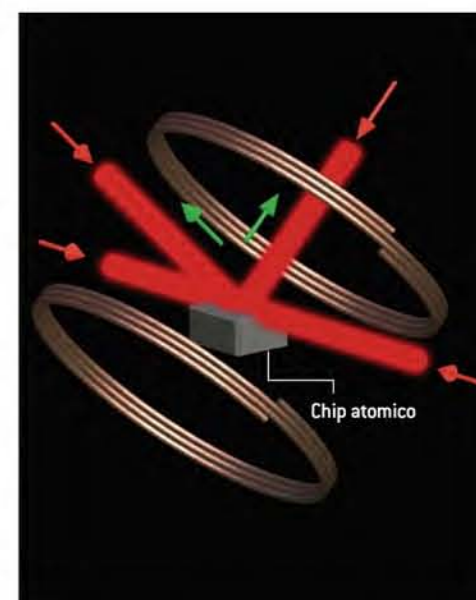
Gli atomi di un gas caldo sono, per molti aspetti, come palline elastiche: si comportano in modo classico, o non quantistico. In realtà a ogni atomo è associato anche un pacchetto d'onda, distribuito su una piccola porzione di spazio. Per atomi ad alta temperatura, i pacchetti sono stretti, ma diventano più larghi via via che la temperatura cala. Un condensato di Bose-Einstein si forma quando un gas è così freddo e denso che i pacchetti d'onda diventano abbastanza ampi da sovrapporsi. In tal modo, gli atomi si trovano nello stesso stato quantico – o lo stesso pacchetto d'onda – fondendosi in un unico ammasso ondulatorio che è il condensato di Bose-Einstein.

Per produrre un condensato di Bose-Einstein occorrono molti strumenti. Il cuore di un esperimento ad atomi freddi è una piccola scatola di vetro circondata da bobine. In questa cella viene praticato il vuoto spinto, ottenendo l'effetto di un thermos iperefficiente. All'interno, viene poi inserita una piccola quantità del gas desiderato. Sei fasci laser si intersecano in un punto all'interno della cella a vuoto. Non è necessario che la luce sia molto intensa, così sono spesso sufficienti economici laser a diodo simili a quelli impiegati nei lettori CD. A temperatura ambiente, gli atomi del gas fluiscono in modo irregolare attraverso la cella con una velocità di molte centinaia di migliaia di chilometri all'ora. Quando entrano in uno dei fasci, la luce laser comincia a raffreddarli molto bruscamente. Inoltre, il debole campo magnetico delle bobine aiuta il laser a spingere gli atomi verso l'intersezione dei sei fasci.

Questa ingegnosa combinazione di luce e campo magnetico, chiamata trappola magneto-ottica (MOT), fu progettata nel 1987 da Jean Dalibard dell'Ecole Normale Supérieure di Parigi. Ma la prima MOT funzionante fu realizzata da David E. Pritchard del Massachusetts Institute of Technology e da Steven Chu della Stanford University. Attualmente la MOT è molto utilizzata nella fisica degli atomi freddi, e con essa si portano gas di rubidio, sodio e di molte altre specie atomiche nel dominio dei microkelvin. Ma la MOT produce una densità piuttosto bassa: gli atomi sono troppo distanti l'uno dall'altro perché le funzioni d'onda di sovrappongano. Così, per avere densità elevate, occorre far intervenire un altro meccanismo: il raffreddamento evaporativo. Quest'ultimo funziona perché, in ogni istante, alcune particelle del gas sono quasi in quiete, mentre le altre hanno una velocità molto maggiore del valore medio. Quando vengono rimossi gli atomi molto veloci, il gas rimanente ha una temperatura più bassa. Questa non è un'idea nuova: è precisamente il fenomeno che si verifica quando si raffredda una tazza di caffè soffiandoci sopra. (Ovviamente per applicare il raffreddamento evaporativo agli atomi ultrafreddi occorrono apparati un po' più sofisticati di una bocca e di un paio di polmoni.)

Negli esperimenti sui condensati di Bose-Einstein, questa operazione si fa in una trappola magnetica, che può essere pensata come un profonda buca dalle pareti immateriali, da cui gli atomi più energetici riescono a fuoriuscire. Le pareti della buca vengono costantemente abbassate in modo che gli atomi continuino a sfuggire, permettendo di procedere con il raffreddamento di quelli rimanenti.

Un elemento essenziale del raffreddamento evaporativo è che gli atomi più lenti che via via rimangono devono ridistribuire la loro energia: alcuni di essi finiscono con l'acquisire una velocità maggiore (e di conseguenza sono rimossi dalla trappola via via che l'evaporazione procede), mentre gli altri diventano ancora più lenti e freddi. Questa ridistribuzione avviene attraverso «buone» collisioni con gli atomi circostanti, distinte da quelle «cattive» che spediscono gli atomi fuori dalla trappola. A questo punto entrano in gioco le trappole a microchip: con deboli correnti si producono campi intensi che comprimono gli atomi più che nel caso delle trappole convenzionali, incrementando il tasso di collisioni «buone».

Nella configurazione MOT standard (*a sinistra*), sei fasci laser (*in rosso*) si incrociano al centro del campo magnetico creato da due bobine. Questa configurazione è difficile da realizzare con un chip, poiché la sua superficie blocca almeno uno dei fasci.

La soluzione (*a destra*) è applicare al chip una copertura a specchio e utilizzare solo quattro fasci invece di sei. La radiazione riflessa (*frecce in verde*) produce due nuovi fasci e gli atomi freddi sono raccolti vicino alla superficie del chip.

Per esempio il mio gruppo di Monaco ha realizzato un «nastro trasportatore» di condensati di Bose-Einstein usando un chip la cui struttura era assai più complicata di una semplice trappola (*si veda l'illustrazione a p. 87*). Quando le correnti applicate ai cavi sono modulate in modo appropriato, una serie di buche di potenziale si muove lungo la superficie del chip; la regolazione delle correnti permette di controllare la velocità di trasporto e la distanza dalla superficie, e il condensato può essere spostato di pochi nanometri. Questo nastro trasportatore di condensati di Bose-Einstein può diventare il nucleo di dispositivi più complessi, per esempio nell'ambito del calcolo quantistico. Ma è solo un primo passo: l'esplorazione delle possibilità di «scolpire» il campo magnetico è appena all'inizio.

Tubi magnetici

Quando i circuiti sono due o tre cavi che corrono in parallelo, il campo magnetico diventa una trappola a forma di tubo lungo la quale gli atomi possono muoversi liberamente. Il tubo magnetico è l'analogo – ma per la materia – di ciò che una fibra ottica è per la luce: una guida d'onda di materia. La luce si muove lungo l'asse di una fibra ottica, seguendo il cammino che essa descrive. Allo stesso modo, un condensato si muove lungo una guida d'onda di materia come un fascio di materia. Molti gruppi di ricerca hanno sviluppato queste guide, sia su microchip sia su dispositivi più ampi, e tecniche per disporvi atomi.

La principale applicazione prevista è l'interferometria atomica. Ogni tipo di interferometria funziona con la combinazione di due onde, che dà come risultato uno schema di ampiezze alte e basse, ovvero un alternarsi di zone di luce e zone d'ombra. Nella maggior parte dei casi l'interferometria si fa con fasci laser, in modo da sfruttare la loro caratteristica di essere costituiti da radiazione coerente. Un condensato di Bose-Einstein che si sposta è come un fascio laser, perché è anch'esso coerente. E anche prendendo due fasci coerenti di atomi si produce il fenomeno dell'interferenza, con un'alternanza di punti luminosi (con molti atomi) e punti bui (con pochi atomi).

Gli interferometri atomici si sono evoluti in pochi decenni, passando dagli esperimenti puramente dimostrativi alle applicazioni in sensori che possono competere con altre tecnologie di ultima generazione (ma ci vorranno altri dieci anni perché si parli delle prime applicazioni commerciali). Possono essere impiegati per misurare la rotazione, la gravità e le sue variazioni locali, tutti dati essenziali per la navigazione aerea come per quella navale. Per esempio, sugli aerei sono installati interferometri a fibra ottica (i giroscopi laser) per misurare il loro stato di rotazione, indispensabile complemento della tradizionale bussola. Con la differenza che i giroscopi a interferometria atomica possono essere più precisi di diversi ordini di grandezza.

Ogni atomo, come una sorta di gatto di Schrödinger, deve correre contemporaneamente lungo i due cammini prodotti da un divisore di fascio

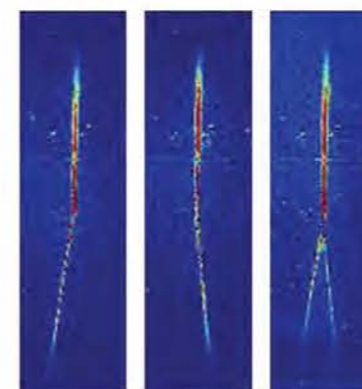
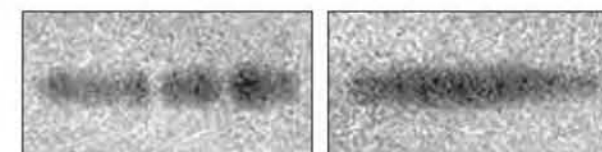
Certo, ci sono ancora diversi importanti problemi da risolvere. Uno è lo sviluppo di divisori di fascio coerenti. I divisori di fascio sono elementi cruciali per il funzionamento di un interferometro. Perché il divisore sia coerente, ogni atomo, come una sorta di gatto di Schrödinger, deve correre contemporaneamente lungo i due cammini prodotti dal divisore di fascio: in altri termini, la funzione d'onda quantistica dell'atomo deve essere divisa in due. Invece i divisori di fascio a chip realizzati finora spezzano in due il fascio in modo troppo drastico: ogni singolo atomo va a destra o a sinistra, anziché andare in entrambe le direzioni contemporaneamente. E i dispositivi non coerenti non possono essere utilizzati in un interferometro. Nel luglio 2004 una collaborazione tra il gruppo di Eric Cornell del JILA e dell'Università del Colorado a Boulder e quello di Mara Prentiss della Harvard University ha realizzato un ingegnoso interferometro laser. I ricercatori hanno creato un condensato di Bose-Einstein su un chip atomico, e con un impulso laser hanno separato il fascio in due parti coerenti che si allontanavano l'una dall'altra. Ulteriori impulsi riunivano poi le due parti per produrre interferenza.

I divisori di fascio non sono i soli dispositivi a dare problemi con le onde di materia. Nel 2002 il gruppo di Zimmermann e quello di David Pritchard al MIT si accorsero di un effetto inatteso quando immettevano un condensato nella guida d'onda di un chip. Invece di vedere il condensato espandersi e riempire la guida fino alla sua estremità, come l'acqua che si propaga in un lungo solco orizzontale, lo videro cominciare a diffondersi per poi fermarsi e separarsi in frammenti (*si veda il box a fronte*). Questi «schizzi» di materia erano stati intrappolati nei lievissimi corrugamenti nella guida magnetica.

Nel marzo 2004 Alain Aspect e i suoi collaboratori all'Istituto di ottica di Orsay, in Francia, dimostrarono con la microscopia a scansione elettronica e con un'elegante analisi che le irregolarità – lievi deviazioni dei cavi dalla loro forma rettilinea – sono la causa dei corrugamenti. Una lieve irregolarità del cavo è sufficiente a curvare il flusso di corrente, distorcendo il campo magnetico. Queste imperfezioni del campo magnetico non erano mai state misurate direttamente con le sonde convenzionali: gli atomi dei condensati di Bose-Einstein sono molto più sensibili.

Un altro problema riguarda effetti ancora più profondi. Negli esperimenti condotti finora, gli atomi dei condensati sono almeno a decine di micrometri dalla superficie del chip. Il loro carattere quantistico sarebbe più pronunciato in trappole più piccole, ma un guaio della miniaturizzazione è che gli atomi sarebbero molto più vicini alla superficie. E a meno di un micrometro di distanza, interagiscono inevitabilmente con essa. Per via di questa interazione, in un esperimento condotto nel 2003 da Vladan Vuletic, giovane docente del MIT, si osservò una perdita di atomi dalla trappola quando questa era a meno di 1,5 micrometri da una superficie non conduttrice.

LE SFIDE DA AFFRONTARE

Le onde di materia sono viaggiatrici piuttosto esigenti. Se si vogliono sfruttare i chip atomici per le applicazioni, bisogna superare alcuni problemi.

Se in un separatore di fascio non c'è coerenza, ogni atomo va o a destra o a sinistra mentre l'obiettivo è che vada contemporaneamente sia a destra sia a sinistra. Qui a fianco è raffigurato un separatore di fascio non coerente che controlla un flusso di atomi di litio grazie alla sua forma a «Y» rovesciata.

La frammentazione di una nube atomica confinata nel campo magnetico di un cavo su un chip indica che il potenziale magnetico non è completamente piatto (*a sinistra*). L'imperfezione nella guida d'onda magnetica è causata dalle irregolarità presenti sui cavi. Quando una nube atomica è esattamente nella stessa posizione ma trattenuta da una trappola puramente atomica che non coinvolge il cavo del chip, non compare alcuna frammentazione (*a destra*).

PER APPROFONDIRE

HINDS E., *Magnetic Chips and Quantum Circuits for Atoms*. in «Physics World», vol. 14, n. 7, pp. 39-44, luglio 2001.

Sezione speciale sulla materia ultrafredda, «Nature», vol. 416, n. 6877, pp. 205-246, 14 marzo 2002.

KASEVICH M. A., *Coherence with Atoms*, «Science», vol. 298, n. 5597, pp. 1363-1368, 15 novembre 2002.

Pagina web del gruppo di microtrappole del Max-Planck-Institut für Quantenoptik di Garching: www.mpq.mpg.de/~jar

Pagina web del gruppo di chip atomici dell'Università di Heidelberg: www.atomchip.org

Infine, un altro effetto che va tenuto in debita considerazione nelle trappole più piccole è il magnetismo termico della superficie del chip. Si immagini un insieme disordinato di piccoli magneti in costante movimento caotico: a scale submicrometriche, è un buon modello di un metallo a temperatura ambiente. A scale più grandi, la media di tutti contributi è nulla, il che spiega perché non sono mai stati osservati finora. Quando sono molto vicini alla superficie, invece, gli atomi dimostrano ancora una volta di essere sonde estremamente sensibili. Il magnetismo termico determina qualche scuotimento nella trappola magnetica, e dopo un po' di tempo gli atomi vengono spazzati via. L'effetto fu previsto nel 1999 da Carsten Henkel, dell'Università di Potsdam, fisico teorico che cominciò a interessarsi ai chip atomici poco dopo la loro invenzione, e fu verificato sperimentalmente nel 2003 da Ed A. Hinds, ora all'Imperial College di Londra, che aveva preventivamente intrappolato atomi freddi con altri mezzi non convenzionali, come per esempio un nastro magnetico.

Per le applicazioni in cui il magnetismo termico è un problema ci sono diverse soluzioni. Il chip può essere raffreddato con azoto liquido o elio liquido, ma questa condizione complica considerevolmente l'apparato. Come previsto da Henkel e dimostrato nel 2003 dal gruppo di Cornell, il magnetismo termico è più debole nei metalli con maggiore resistività. Così, usando titanio invece di oro o rame, si riducono le perdite.

Le guide d'onda, e le loro applicazioni negli interferometri atomici, sfruttano un particolare aspetto della natura quantomeccanica dell'atomo: il suo carattere ondulatorio. Altri fenomeni quantistici portano ad applicazioni ancora più rivoluzionarie. Oggi la star del mondo dei quanti è il computer quantistico (si veda l'articolo *Le regole del mondo quantistico*, di Michael A. Nielsen, in «Le Scienze» n. 412, dicembre 2002). Questo computer del futuro sfrutterà il principio di sovrapposizione – un'altra caratteristica peculiare dei sistemi quantistici – per fare certi calcoli più velocemente di qualunque computer classico. Un computer quantistico funziona manipolando *qubit*, la versione quantistica dei bit. Un bit logico classico può essere o vero o falso, «1» o «0». Un qubit, invece, può esistere in una sovrapposizione di stati che corrisponde a un misto di vero e falso, così come il gatto di Schrödinger si può trovare in una miscela degli stati «vivo» e «morto».

In un computer classico, i calcoli corrispondenti a differenti stati di bit devono essere eseguiti uno dopo l'altro. Con i qubit, gli stessi calcoli possono essere eseguiti elegantemente allo stesso tempo. È stato provato che, per alcuni problemi, questa caratteristica rende un computer quantistico molto più veloce di qualunque computer classico.

L'occupazione preferita di coloro che si occupano di fisica quantistica, di questi tempi, è di pensare a metodi pratici per realizzare un computer quantistico: con ioni confinati, con molecole di grandi dimensioni, con spin elettronici, oppure, infine, con condensati di Bose-Einstein su chip atomici. L'idea è di per sé allettante, perché questi chip quantistici sembrano molto simili ai chip microelettronici tradizionali, ma allo stesso tempo sono radicalmente nuovi. Inoltre, per mettere insieme i qubit affinché interagiscano in modo controllato, si potrebbe utilizzare il nastro trasportatore atomico.

La ricerca sui condensati su chip è una commedia ancora all'inizio. Come sempre accade nella scienza, la trama non si sa in anticipo, e gli stessi attori entrano in scena via via che la rappresentazione procede. Le sorprese, piacevoli o spiacevoli che siano, non mancheranno; alcuni ostacoli saranno superati, altri ci obbligheranno a cambiare direzione. Comunque vada, la fisica classica e quella quantistica finiranno per essere sempre più vicine sulle scene della scienza.

LA MATERIA DEI CROMOSOMI. Proteine e cromatina, una sostanza costituita da elementi di DNA, sono il materiale che compone i cromosomi, all'interno dei quali è strettamente impacchettato il DNA della cellula. Elementi di base della cromatina sono gli istoni, molecole proteiche che si sono mantenute inalterate in tutti gli organismi eucarioti, compreso l'uomo, di cui si vedono alcuni cromosomi in questa microfotografia.

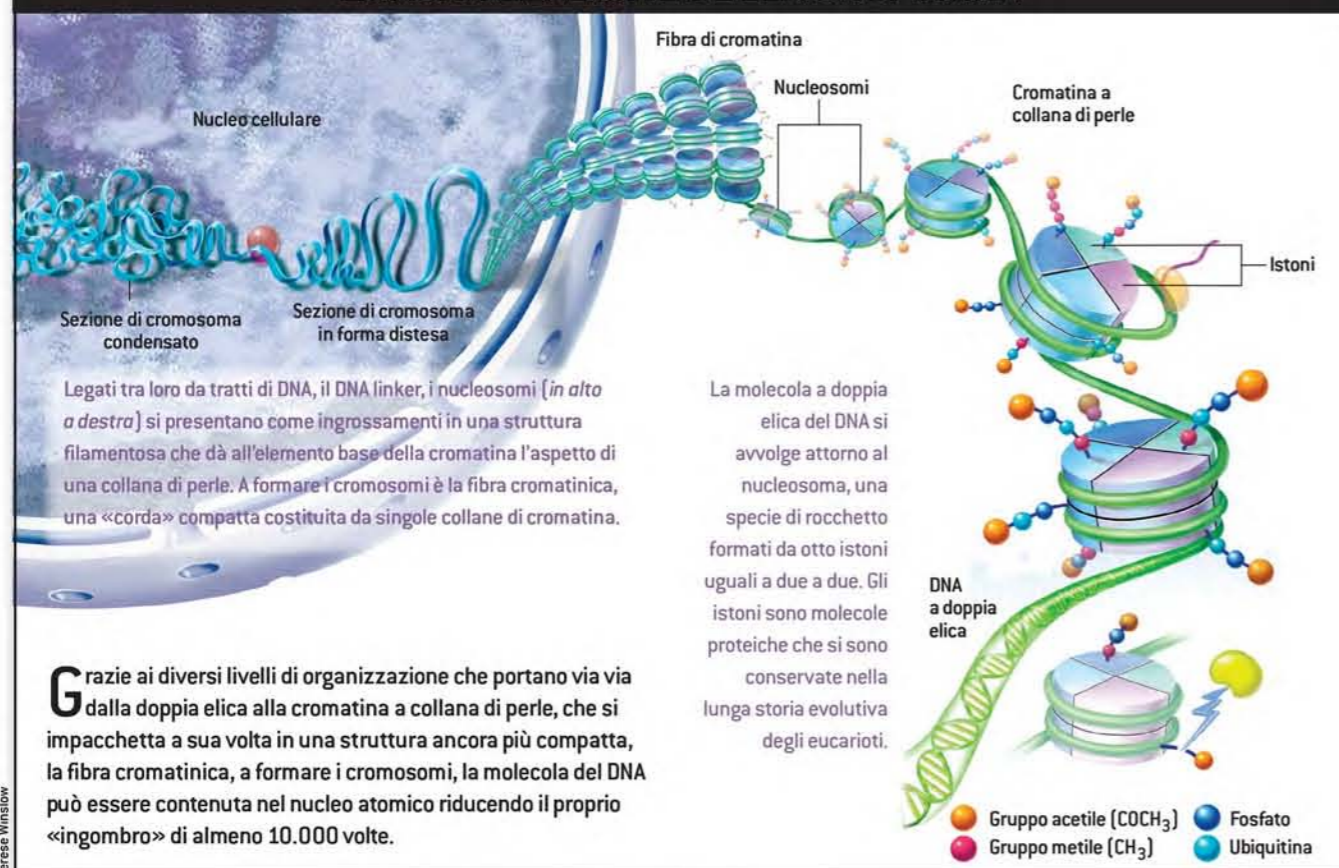
Un nuovo codice per la memoria delle piante

di Serena Varotto
e Vincenzo Rossi

I cambiamenti della struttura della cromatina sono fondamentali per lo sviluppo post-embrionale

Quasi tutto è cominciato quando ci si è accorti che, nelle piante geneticamente modificate, i transgeni possono essere inattivati, in gergo silenziati, nel passaggio da una generazione all'altra. Quasi tutto, però, perché l'epigenetica – o *funny genetics*, come era stata definita per il suo non voler rispettare le regole della genetica mendeliana – era già nota ai ricercatori. Con il termine epigenetica sono indicati tutti quei meccanismi che regolano l'attività genica senza modificare la sequenza nucleotidica del DNA, e che sono trasmessi ereditariamente nel corso delle generazioni. I fenomeni di natura epigenetica sono una caratteristica di tutti gli organismi viventi. Nel moscerino della frutta, l'analisi dei meccanismi che influenzano l'espressione genica nel corso dell'embriogenesi aveva sottolineato l'importanza del contesto strutturale in cui si trova un determinato gene, ovvero l'influenza dell'organizzazione della cromatina in cui il gene è contenuto, al fine di regolare correttamente la sua espressione spazio-temporale. La cromatina – che in passato si pensava svolgesse esclusivamente un'azione strutturale – è oggi ritenuta un regolatore fondamentale delle funzioni del genoma.

Cos'è dunque, la cromatina? Negli eucarioti, gli esseri viventi le cui cellule sono dotate di nucleo, per poter essere contenuto all'interno del nucleo della cellula, il DNA è impacchettato nei cromosomi, i quali sono almeno 10.000 volte più brevi della molecola di DNA in essi presente. I cromosomi sono composti di cromatina, una sostanza a sua volta costituita da DNA, proteine istoniche e proteine non-istoniche. L'unità di base della cromatina è il nucleosoma, caratterizzato nel 1974 da due scienziati statunitensi e costituito da un ottamero di istoni, molecole proteiche che formano una specie di rocchetto attorno al quale sono avvolti 146 nucleotidi di DNA. L'ottamero è costituito da due molecole per ciascuno di quattro diversi istoni: H2A, H2B, H3 e H4.

Per ottenere la struttura finale della cromatina i nucleosomi sono organizzati in strutture complesse. Innanzitutto sono legati tra loro da tratti di DNA, il DNA linker, che, al microscopio elettronico, le danno l'aspetto di una collana di perle. Il DNA linker e il centro dei nucleosomi sono tenuti insieme da un'altra proteina istonica, l'istone H1, che determina la formazione della fibra di cromatina. Il livello finale di organizzazione è raggiunto quando la fibra di cromatina condensa in un cromosoma metafasico, osservabile al microscopio ottico limitatamente a un intervallo preciso del ciclo cellulare, la metafase, in cui i cromosomi si allineano nella parte centrale della cellula. Nei cromosomi, la cromatina è organizzata in domini funzionali definiti eucromatina ed eterocromatina, con differente architettura, attività trascrizionale e tempi di replicazione.

Le ricerche degli ultimi anni hanno evidenziato che la struttura della cromatina non è stabile ma, al contrario, altamente dinamica, ed è regolata da una serie di fattori epigenetici. Un primo fattore è legato all'attività di complessi proteici che possono far scivolare i nucleosomi lungo la doppia elica di DNA o allentare i legami tra nucleosoma e DNA. Questa attività richiede dispendio di energia da parte della cellula, e prende il nome di «rimodellamento della cromatina». Un secondo meccanismo in grado di alterare la struttura della cromatina è correlato alle modificazioni chimiche delle proteine istoniche. Una caratteristica di queste proteine, che sono tra le famiglie geniche più conservate nel corso dell'evoluzione degli eucarioti, è quella di presentare lungo la loro sequenza regioni che sono ampiamente modificate dopo la loro sintesi.

Acetilazione, metilazione e fosforilazione sono le modificazioni chimiche più frequenti e meglio studiate degli istoni. Si tratta, peraltro, di modificazioni reversibili, nelle quali intervengono enzimi che hanno la funzione di apportare o di eliminare i cambiamenti. L'acetilazione, per esempio, è l'aggiunta di un gruppo acetilico all'amminoacido lisina, di cui le parti terminali degli istoni sono particolarmente ricche. E nel nucleo cellulare si osserva una continua attività di acetilazione e deacetilazione di queste regioni, operata da due classi di enzimi che hanno funzioni opposte: le acetilasi e le deacetilasi istoniche.

L'insieme dei processi che abbiamo descritto può determinare il passaggio da una forma cromatinica molto condensata a una più rilassata, un cambiamento che si è dimostrato di fondamentale importanza per l'attività e la funzionalità dei geni. Quando il DNA è impacchettato in una struttura cromatinica altamente condensata, per esempio, la trascrizione di un gene non è possibile. È il decondensamento della cromatina a rendere il DNA accessibile ai complessi proteici che ne permettono la trascrizione. Inoltre, i meccanismi appena descritti possono regolare l'attività genica operando sulla struttura dove è impacchettato il DNA, la cromatina, senza modificarne la sequenza nucleotidica. Ed è per questo che sono definiti «meccanismi di regolazione epigenetica» (*si veda la figura a p. 96*).

A questo proposito, numerosi ricercatori hanno formulato una stimolante e innovativa ipotesi, secondo la quale al classico codice genetico, basato sulla sequenza dei quattro nucleotidi che si susseguono lungo la doppia elica del DNA, si affianca un codice «epigenetico», fondato sui meccanismi che regolano la struttura della cromatina. L'insieme dei due codici migliora la comprensione dei fenomeni che determinano la funzionalità del genoma negli organismi viventi.

Ma di che cosa si tratta? Quali sono gli elementi alla base del codice epigenetico? Sopra abbiamo accennato all'esistenza di enzimi che apportano modificazioni chimiche agli istoni. Il numero e la varietà delle modificazioni istoniche sono molto elevati, e le diverse possibili combinazioni sono molteplici. Ebbene, queste combinazioni costituiscono un codice degli istoni, scritto dagli enzimi che li modificano e letto e interpretato dai regolatori molecolari della cellula. Secondo questa ipotesi, per ogni regione del genoma, a una determinata sequenza di modificazioni istoniche corrisponde un'informazione epigenetica interpretata da proteine in grado di attivare o reprimere l'attività di quella specifica regione (*si veda la figura nel box a p. 97*).

Ma ci sono anche altri elementi che si aggiungono alle modificazioni chimiche degli istoni, aumentando le possibili combinazioni delle «lettere» che compongono il codice epigenetico. Tra questi vanno annoverate le modificazioni chimiche che sono apportate direttamente alla molecola del DNA: la più importante è la metilazione delle citosine della doppia elica operata da una classe di enzimi noti con il nome di DNA metiltransferasi. Questa alterazione non ha alcun effetto sulla capacità codificante del DNA, eppure la metilazione del DNA risulta come una sorta di «marchio» che delimita specificamente le regioni genomiche inattive. Analogamente alle modificazioni degli istoni, la metilazione delle citosine inibisce l'accessibilità del DNA agli attivatori dei geni. Altri componenti del codice epigenetico sono elencati nel box a p. 97, dove si sottolinea come le modificazioni di tutti gli elementi risultano interdipendenti, determinando così la sorprendente complessità del codice epigenetico.

In sintesi/*La materia dei cromosomi*

- La cromatina, il materiale di cui sono composti i cromosomi di tutti gli organismi eucarioti, ha una struttura altamente dinamica, governata da una serie di fattori epigenetici, che le permette di svolgere un fondamentale ruolo di regolazione dell'espressione genica.
- Processi reversibili come l'acetilazione, la metilazione e la fosforilazione degli istoni possono determinare il passaggio della cromatina da una forma più compatta a una più rilassata, nella quale il DNA diventa accessibile allle proteine che ne permettono la trascrizione, garantendo la funzionalità dei geni.
- Nelle piante, la cromatina contribuisce a regolare il processo di fioritura e influenza in maniera sostanziale i processi di sviluppo. Approfondirne il ruolo e i meccanismi d'azione potrebbe permettere di controllare numerosi processi di elevato interesse biotecnologico.

GLI AUTORI

SERENA VAROTTO e VINCENZO ROSSI sono ricercatori rispettivamente presso l'Università di Padova e l'Istituto sperimentale per la cerealicoltura di Bergamo. Da anni collaborano allo studio dei meccanismi epigenetici attivi nella regolazione dell'attività genica e nello sviluppo delle piante.

Il codice epigenetico si fonda sui meccanismi che regolano la struttura **della cromatina**

Glossario minimo

- *Trascrizione genica*: è il processo mediante il quale l'informazione genetica contenuta nelle sequenze del DNA viene trasferita all'RNA messaggero (mRNA). La trascrizione del DNA in mRNA garantisce l'espressione dei geni.
- *Eucromatina*: regione di cromatina in cui è attiva la trascrizione del DNA in mRNA.
- *Eterocromatina*: regione di cromatina in cui non vi è attività di trascrizione e di conseguenza si ha silenziamento genico.
- *Istoni*: sono piccole proteine basiche molto conservate che compongono la cromatina di tutti gli eucarioti. Una volta che gli istoni si sono assemblati e associati al DNA nella formazione del nucleosoma, cioè l'unità di base della cromatina, possono subire delle modificazioni chimiche covalenti.

Professori P. Motta & T. Naguro/SPL/Grazia Neri

FIBRE DI CROMATINA CIRCONDANO IL NUCLEOLO (*in rosa*), un'area specializzata nella sintesi dell'RNA ribosomale, in questa microfotografia di una cellula di embrione umano di otto settimane.

Una trasmissione complessa

Come l'informazione rappresentata dal codice genetico, anche quella correlata al codice epigenetico è trasmessa ereditariamente da una generazione cellulare alla successiva. Questa caratteristica garantisce la trasmissione di un determinato stato di organizzazione della cromatina per ogni regione del genoma,

LA STRUTTURA DELLA CROMATINA regola l'attività dei geni. Una struttura molto condensata della cromatina (*sopra*) rende il gene inaccessibile ai fattori che ne stimolano la trascrizione (indicati come complesso dell'RNA polimerasi II, RNAPII e vari tipi di fattori trascrizionali, TF) e il gene è inattivo. In un certo momento della vita di una cellula, o in risposta a specifici segnali regolativi, può essere richiesta l'attivazione del gene. In questo caso, i fattori che regolano la struttura della cromatina rispondono provocando un rilassamento della cromatina. Il DNA diventa così accessibile a fattori trascrizionali che attivano il gene. La doppia freccia indica che il processo è reversibile. I meccanismi descritti regolano l'attività genica operando sulla struttura dove è impacchettato il DNA senza modificarne la sequenza nucleotidica; in tal senso sono detti meccanismi di regolazione epigenetica.

mantenendo così l'informazione che ne determina l'attivazione o il silenziamento.

I meccanismi che permettono la trasmissione e il mantenimento del codice epigenetico non sono però ancora del tutto chiari. Non si capisce, per esempio, come sia possibile che le regioni altamente condensate dell'eterocromatina si mantengano attraverso passaggio da una generazione cellulare all'altra: perché ciò sia possibile, occorre un meccanismo per cui la doppia elica del DNA viene prima svolta per essere replicata, e poi ricompattata esattamente nelle stesse regioni del genoma. Studi recenti hanno iniziato a chiarire questo enigma, individuando il ruolo svolto dai microRNA, corti frammenti di molecole di RNA. I microRNA derivano da una minima attività trascrizionale di sequenze ripetute, caratteristiche delle regioni di eterocromatina, poco o per nulla attive nella trascrizione. Essi, mediante un meccanismo definito interferenza dell'RNA, sono in grado di appaiarsi al filamento complementare del DNA, veicolandone uno specifico profilo di modificazioni istoniche e modificazioni del DNA. Questo profilo di modificazioni determina la formazione di una struttura cromatinica molto condensata e stabilisce una sorta di marchio, che consente il mantenimento dell'eterocromatina in punti specifici del genoma anche dopo la replicazione del DNA.

Il linguaggio delle piante

Abbiamo sopra discusso dei meccanismi che regolano la struttura della cromatina e, con essa, processi quali la trascrizione e il silenziamento genico. Questi meccanismi sono estremamente conservati tra gli eucarioti, ma la loro integrazione con i processi di sviluppo e morfogenesi è differenziata nei diversi organismi. Per esempio, mentre il codice genetico è universale, il linguaggio del codice epigenetico, nonché i fattori adibiti alla sua decifrazione, differiscono negli animali, nei funghi e nei vegetali.

In particolare, le piante hanno caratteristiche peculiari che le rendono uniche tra gli esseri viventi; perciò non sorprende che ci sia un «linguaggio» della cromatina specifico delle piante. Ma perché e in quali occasioni nelle piante si verificano i processi di regolazione della struttura della cromatina? Vale la pena iniziare osservando le caratteristiche che differenziano le piante dagli altri esseri viventi. Prima di tutto, l'embrione delle piante non costituisce un individuo in miniatura; lo sviluppo post-embrionale è garantito dall'attività di piccole masse di cellule, i meristemi, che differenziano i diversi organi della pianta. Le cellule dei meristemi sono dette «totipotenti» perché il loro destino non è predeterminato, ma può essere stabilito in risposta alle condizioni ambientali nelle quali la pianta si sviluppa. Le piante sono sessili, perciò devono sapersi rapidamente adattare alle variazioni anche improvvise dell'ambiente che le circonda.

Queste caratteristiche fanno sì che i processi di sviluppo delle piante siano particolarmente plastici e reversibili. E il rimodellamento della cromatina è un meccanismo estremamente versatile per incidere nella propria memoria cellulare il ricordo di eventi e segnali transitori. È un meccanismo stabile, che si può tramandare da una generazione cellulare a un'altra ma che può anche essere riazzerato, come spesso accade nella fase di riproduzione mediante la formazione di cellule gamiche. Non a caso abbiamo usato il termine versatile. Meccanismi alternativi, come una variazione delle sequenze del DNA o dei processi fisiologici cellulari, sono

GLI ELEMENTI DEL CODICE EPIGENETICO

I fattori che compongono il codice epigenetico sono molteplici. Innanzitutto ci sono i diversi tipi di modificazioni chimiche degli istoni. Nella figura in basso è brevemente illustrato come modificazioni a carico di un istone (nell'esempio si tratta dell'istone H3) si influenzino l'una con l'altra. Ci sono però molte altre interazioni possibili e altri fattori. Ne elenchiamo alcuni partendo dall'esempio della figura.

■ Altre modificazioni dell'istone H3. Oltre a quelle illustrate qui sotto ci sono altre modificazioni chimiche in diversi residui amminoacidici. Tutte queste modificazioni si influenzano tra loro in modo simile a quello indicato nella figura.

■ Modificazioni della seconda molecola di H3. L'ottamero istonico è formato da due molecole di H3; la seconda molecola ha un profilo di modificazioni che può essere identico o diverso dalla prima, ma in ogni caso i due profili si influenzano tra loro.

■ Modificazioni di H2A, H2B e H4. Come per H3, le molecole di ognuno degli altri istoni subiscono modificazioni che si influenzano tra loro (influenza tra siti adiacenti nella stessa molecola definita interazione in cis).

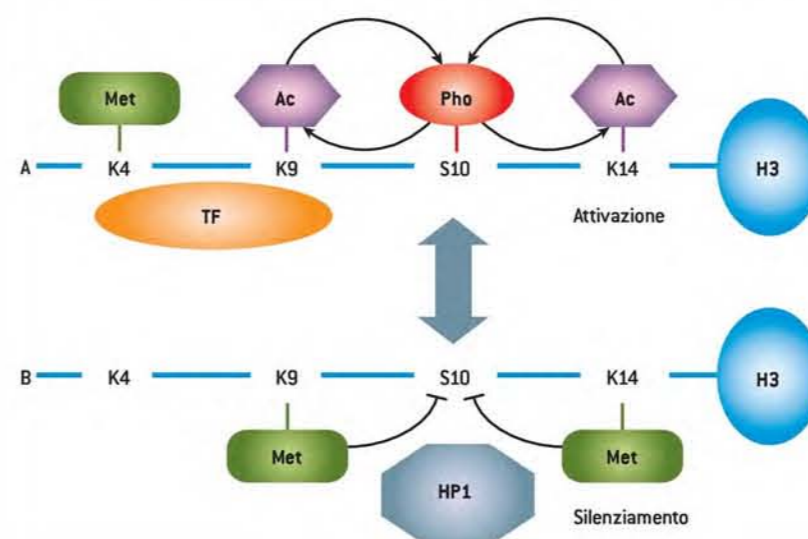
■ Interazioni tra le modificazioni dei diversi istoni nel core nucleosomico. Poiché un nucleosoma è composto di due molecole per ognuno dei quattro istoni H2A, H2B, H3 e H4, le modificazioni a carico di un istone possono influenzare il profilo di modificazione degli altri tipi di istoni dello stesso nucleosoma (influenza tra siti su molecole diverse definita interazione in trans).

■ Interazioni tra nucleosomi adiacenti. Le modificazioni a carico di un nucleosoma influenzano quelle dei nucleosomi vicini.

■ Modificazioni di H1 e proteine non istoniche della cromatina. Oltre agli istoni del core nucleosomico, anche l'istone linker H1 e altre proteine che compongono la cromatina subiscono modificazioni chimiche. E c'è un'influenza reciproca tra queste alterazioni e quelle del core nucleosomico.

■ Varianti istoniche. Per ognuno dei canonici istoni esistono una o più «varianti». Si tratta di molecole molto simili alla loro forma «classica» ma con piccole modifiche nella sequenza amminoacidica. Queste modifiche sono però molto importanti, perché determinano specifici profili di modificazioni chimiche. Le varianti sono inoltre depositate selettivamente, al posto delle forme classiche, per formare nucleosomi specificamente associati all'attivazione o silenziamento genico.

■ Metilazione del DNA. La metilazione del DNA (si veda il testo per una spiegazione più dettagliata) è strettamente legata alle modificazioni degli istoni, in quanto è in grado di dirigerne alcune e ne risulta a sua volta influenzata.

Da quanto detto, si può intuire come tutti questi elementi contribuiscano a formare un codice estremamente vario, che può trasmettere un'informazione molto complessa.

LE MODIFICAZIONI DELLA CROMATINA in siti adiacenti si influenzano a vicenda. Per esempio (*A*), la lisina 9 (K9) dell'istone H3 può essere acetilata (Ac) favorendo la fosforilazione (Pho) della serina 10 (S10) e viceversa. Una simile interazione si ha anche tra acetilazione della lisina 14 (K14) e fosforilazione della serina 10. In concomitanza, risulta metilata (Met) la lisina 4 (K4). Queste modificazioni sono interpretate da un regolatore di trascrizione positivo (TF) e portano a un'attivazione della regione genomica. Quando invece (*B*) le lisine 9 e 14 vengono deacetilate e poi metilate, si ha un'inibizione della fosforilazione della serina 10 e la lisina 4 non è più metilata. Il nuovo profilo istonico richiama un regolatore negativo (HP1) che determina condensazione della cromatina e silenziamento genico.

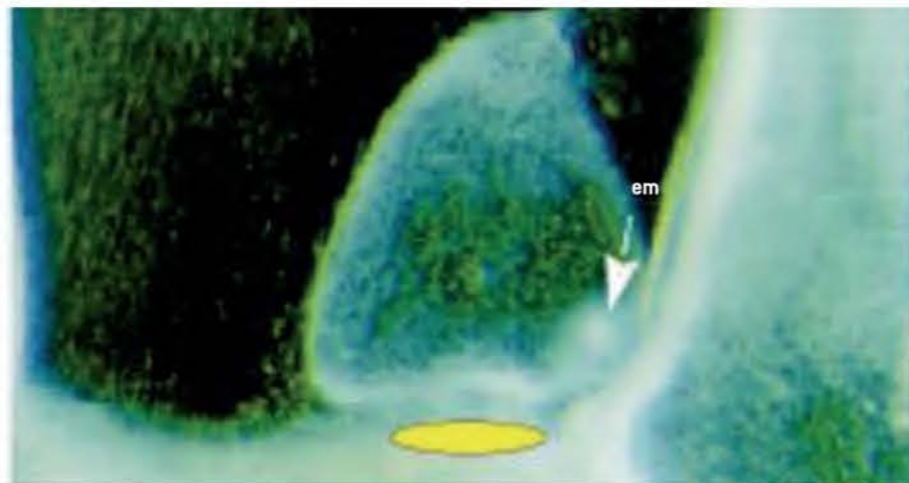
cambiamenti meno reversibili e più complicati da regolare. Ma vediamo come il rimodellamento della cromatina è utilizzato per incidere eventi e segnali transitori nella memoria delle piante.

Il programma della fioritura

La transizione da una fase vegetativa a una fase riproduttiva è uno dei processi più importanti durante lo sviluppo post-embrionale delle piante. Durante questa transizione il meristema vegetativo a crescita indeterminata si differenzia in un meristema fiorale a crescita determinata. Secondo le teorie più recenti, nelle piante la fase vegetativa è garantita dalla repressione del programma riproduttivo, in quanto i geni che promuovono lo sviluppo vegetativo sono repressori della differenziazione del meristema fiorale.

Una corretta programmazione della fioritura è fondamentale, sia allo scopo di garantire l'interincrocio in una specie, sia per ottimizzare la produzione di discendenza dal seme. In molte specie vegetali adattate ai climi temperati, la vernalizzazione – cioè l'esposizione a temperature comprese tra zero e cinque gradi per

Gentile concessione dott. Clara Zuin, CNR-IBAF, Legnaro (PD)

IL FIORE DI *AMMANIA COCCINEA*, una pianta annuale naturalizzata nelle risaie piemontesi e sensibile alla vernalizzazione. La vernalizzazione garantisce che la fioritura avvenga in primavera, quando le condizioni climatiche sono favorevoli alla produzione di seme. Sotto, due immagini dello sviluppo dell'endosperma di mais. Le foto sono sezioni longitudinali di una cariosside quattro giorni dopo la fecondazione. Sono visibili l'embriosacco (es) e il parenchima nucellare (np). A questo stadio di sviluppo, l'embrione (em) è piccolo rispetto all'endosperma, che occupa la maggior parte dell'embriosacco.

Da Olsen O.A., Lemmon B. e Brown R., *A model for aleurone development*, in «Trends in Plant Science» vol. 5, pp. 168-169, 1998

Simon Fraser/SPL/Grazia Neri

UNA PIANTA MODELLO. Grazie agli studi condotti su *Arabidopsis thaliana* è stato possibile scoprire, individuando piante insensibili alla vernalizzazione, il meccanismo fondamentale attraverso il quale l'esposizione alle basse temperature in inverno induce successivamente la fioritura.

una durata da uno a tre mesi – accelera e sincronizza la fioritura nella stagione primaverile. La vernalizzazione ha molte caratteristiche tipiche dei processi epigenetici. Innanzitutto prevede una separazione temporale tra uno stimolo (il freddo) e la risposta allo stimolo (la differenziazione del meristema fiorale). In secondo luogo imprime nella memoria della pianta il messaggio di un evento transitorio. Infine, determina un cambiamento genetico reversibile, perché l'informazione non è tramandata alla discendenza.

Gli studi molecolari condotti sulla specie vegetale modello *Arabidopsis thaliana* hanno chiarito che la vernalizzazione determina una riduzione quantitativa dell'espressione di un gene repressore della transizione a fiore denominato Flowering Locus C (FLC). FLC è un fattore di trascrizione, che inibisce la differenziazione a fiore e i cui quantitativi variano nelle cellule in relazione al tempo mancante alla fioritura. Dopo la vernalizzazione e l'esposizione a temperature più miti, i quantitativi del trascritto del gene rimangono bassi anche nelle strutture che la pianta differenzia in condizioni climatiche più temperate. I livelli di FLC tornano elevati nella progenie delle piante vernalizzate: questo meccanismo fa sì che ciascuna generazione debba essere vernalizzata per fiorire nella stagione primaverile. Durante la vernalizzazione, la cromatina di FLC è modificata mediante acetilazione e metilazione di specifiche regioni dell'istone H3. Queste modificazioni agiscono come segnale per il reclutamento di altri mediatori responsabili del silenziamento di FLC.

Grazie all'individuazione di piante di *Arabidopsis thaliana* mutanti, insensibili alla vernalizzazione, è stato ulteriormente chiarito il meccanismo attraverso il quale l'esposizione a basse temperature induce la differenziazione a fiore. In questi mutanti, la vernalizzazione riduce le quantità di FLC, ma gli organi vegetali che si differenziano dopo l'esposizione a basse temperature presentano ripristinati livelli del trascritto di FLC. In altre parole, in queste piante si conserva la capacità di abbassare i livelli del gene ma è compromessa la funzione di mantenerne ridotti i quantitativi dopo la vernalizzazione.

Qual è dunque la funzione genica perduta da questi mutanti? In essi è alterata la funzionalità di un gene, denominato VRN2, che codifica per una proteina indotta dalle basse temperature e coinvolta nella stabilizzazione della struttura della cromatina in una conformazione in grado di reprimere la trascrizione di FLC. Di conseguenza, il gene repressore della transizione a fiore ritorna a essere espresso regolarmente: l'inverno è trascorso invano.

Inoltre si è osservato che nei mutanti l'istone H3 non è metilato nella cromatina di FLC, e ciò indica chiaramente che elementi del codice epigenetico sono coinvolti nell'induzione alla fioritura indotta dalle basse temperature. Pertanto il rimodellamento della cromatina e il mantenimento di un suo particolare stato di organizzazione garantiscono alla pianta lo stimolo e il ricordo della vernalizzazione, allo scopo di sincronizzare nella specie la fioritura e di realizzarla nelle condizioni climatiche più favorevoli.

Una nuova forma del complesso di Edipo

Ciascun organismo vivente riceve una copia completa del genoma dalla madre e dal padre. Di norma, i geni di origine materna e paterna sono espressi in maniera identica negli individui. Ma in alcuni casi, a seguito di un meccanismo epigenetico definito imprinting genomico (effetto parentale), si ha un'espressione differenziale dei geni dovuta al silenziamento di una delle due copie presenti nel DNA.

Lo sviluppo dei semi delle piante rappresenta un ottimo esempio di espressione differenziale dei geni di origine paterna e materna. Nelle angiosperme, il seme è prodotto a seguito di una doppia fecondazione che produce che produce lo zigote dal quale sviluppa l'embrione, derivante dall'unione della cellula uovo con il nucleo spermatico, e l'endosperma triploide, vale a dire una cellula che contiene tre genomi, due materni e uno paterno. L'endosperma ha un ruolo importante durante lo sviluppo del seme, in quanto fornisce all'embrione i segnali di origine materna e i nutrimenti necessari all'embriogenesi. Nei cereali l'endosperma è persistente, e alla maturazione del seme costituisce il maggior organo di riserva, avendo accumulato amido e proteine. In altre specie, l'endosperma si accresce durante le prime fasi di sviluppo del seme ma le sue riserve sono successivamente mobilizzate durante l'embriogenesi. In queste specie, l'embrione accumula le riserve per la germinazione in due strutture fogliari, i cotiledoni, e alla maturità l'endosperma è costituito da pochi strati cellulari.

Un'alterazione nel dosaggio parentale, che come abbiamo detto di norma è di due genomi materni e uno paterno, ha un effetto decisivo sullo sviluppo dell'endosperma. Questa osservazione suggerisce che l'imprinting parentale ha un ruolo importante nella regolazione dei processi di maturazione dell'endosperma. Come si realizza l'espressione differenziale dei geni di origine paterna e materna? L'effetto parentale è correlato a un differente stato di organizzazione della cromatina e di metilazione delle sequenze geniche; in particolare, i geni materni espressi nell'endosperma hanno sequenze di DNA demetilate e cromatina decondensata rispetto ai geni paterni che, essendo più metilati e con cromatina altamente condensata, risultano sovente silenziati. Anche in questo caso, quindi, i meccanismi epigenetici sono i responsabili dell'espressione differenziale dei geni di origine materna e paterna, garantendo così la regolarità dello sviluppo dell'endosperma e parallelamente quella del seme.

È chiaro, insomma, che il rimodellamento della cromatina influenza in modo sostanziale i processi di sviluppo nelle piante. Così, se da un lato è vero che la «rivincita» dell'epigenetica è iniziata con la scoperta del silenziamento dei transgeni, successivamente la ricerca si è estesa allo studio del suo effetto sullo sviluppo dei vegetali. Spesso, come negli esempi sopra riportati, si tratta di aspetti di notevole importanza applicativa. In molte specie vegetali è richiesto il processo di vernalizzazione al fine di indurre la fioritura. Ne deriva che la piena conoscenza del meccanismo che regola la transizione a fiore determinerà una ricaduta notevole sul controllo e la possibile manipolazione genetica di questa fase dello sviluppo dei vegetali. Analogamente, la comprensione dei meccanismi che regolano la produzione dell'endosperma e del seme sin dalle prime fasi dopo la fecondazione avrà un notevole impatto dal punto di vista agronomico e per la produzione alimentare.

Infine, la comprensione dei meccanismi che controllano l'espressione dei geni, siano essi di natura genetica o epigenetica, è fondamentale per le applicazioni biotecnologiche nel settore vegetale. L'obiettivo è quello di posizionare i transgeni in un punto preciso del genoma e, sfruttando le caratteristiche dei regolatori epigenetici, ottimizzarne l'espressione con il fine di renderla specifica di alcuni tessuti. Se si riuscissero a controllare questi meccanismi, per esempio, si potrebbe ottenere una pianta geneticamente modificata resistente nei confronti di un parassita delle foglie senza che il transgene della resistenza sia espresso nel frutto, con il beneficio di una maggiore sicurezza alimentare. Gli obiettivi sono ambiziosi, le ricerche da compiere entusiasmanti.

PER APPROFONDIRE

WOLFFE A.P., *Chromatin: structure and function*, Academic Press, San Diego, 1998.

STRAHL B.D. e ALLIS C.D., *The language of covalent histone modifications*, in «Nature», vol. 403, pp. 41-45, 2000.

BIRD A., *DNA methylation patterns and epigenetic memory*, in «Genes & Development», vol. 16, pp. 6-21, 2002.

GOODRICH J. e TWEEDIE S., *Remembrance of things past: chromatin remodeling in plant development*, in «Annual Review of Cell and Developmental Biology», vol. 18, pp. 707-746, 2002.

LIPPMAN Z. e MARTIENSSEN R., *The role of RNA interference in eterochromatic silencing*, in «Nature», vol. 431, pp. 364-370, 2004.

LOIDL P., *A plant dialect of the histone language*, in «Trends in Plant Science», vol. 9, pp. 84-90, 2004.

HE Y. e AMASINO R.M., *Role of chromatin modification in flowering-time control*, in «Trends in Plant Science», vol. 10, pp. 30-35, 2005.

http://www.chromatin.us: sito web dedicato alla cromatina.

http://www.chromdb.org: sito web dedicato alla cromatina nelle piante.

L'ARMATA DEL VELENO

Il caso di un'organizzazione di «giustizia popolare» in Tanzania aiuta a capire cosa determina il successo di un gruppo sociale

di Brian Paciotti, Craig Hadley, Christopher Holmes e Monique Borgerhoff Mulder

Zefa/T. Sikora

In un remoto villaggio della Tanzania, un giorno del 1998, i membri dell'etnia sukuma si riunirono per giudicare una trasgressione alle regole sociali. Il capo locale della loro organizzazione di giustizia – chiamata Sungusungu – aveva offerto carne a un non membro in occasione di una festa, mentre le regole del gruppo consentono solo ai membri del Sungusungu di mangiare carne durante eventi del genere. Può sembrare un'infrazione da poco, ma diede origine a un infuocato dibattito. Centinaia di membri del Sungusungu, gridando, accusarono il loro capo di essere un ladro. Per punizione, l'uomo fu rimosso dall'incarico e gli fu imposta un'ammenda.

In Tanzania, come in molti altri paesi, la gente è abituata alla corruzione. I cittadini considerano la polizia disonesta e inefficiente, ma raramente si indignano al punto di unirsi per lottare contro il problema. Nel 1979, però, nel corso di una guerra con la confinante Uganda, la vita in Tanzania diventò più difficile del solito. Uomini armati sconfinavano regolarmente nel paese, razziando il bestiame. Nei primi anni ottanta, i furti di bestiame – il bene più prezioso dei Sukuma – si fecero così frequenti da scatenare una reazione collettiva più energica. Per far fronte agli attacchi, i Sukuma crearono il Sungusungu.

In swahili, il termine Sungusungu denota una specie di formiche fortemente cooperative e aggressive; nella lingua sukuma, invece, significa «veleno». In meno di un anno, l'altrettanto fortemente cooperativo e aggressivo Sungusungu si sviluppò a dismisura, trasformandosi da iniziativa locale, limitata a pochi villaggi della Tanzania settentrionale, in un sistema di giustizia di successo, replicato e adottato entusiasticamente dalle comunità sukuma di tutto il paese: un risultato non indifferente in una nazione con poche strade e un'infrastruttura di telecomunicazioni assai limitata.

In meno di un anno, il Sungusungu si è sviluppato da organizzazione locale a **sistema di giustizia nazionale**

Alcuni considerano i membri del Sungusungu come una sorta di vigilantes. I gruppi hanno fatto giustizia usando metodi sommari, da malavitosi, che andavano dalla caccia ai ladri con frecce avvelenate alle esecuzioni pubbliche. Più che di furti di bestiame, comunque, ora il Sungusungu si occupa di crimini generici verso la proprietà, dispute sui debiti, casi di adulterio e stregoneria. L'aspetto più interessante, forse, è che questo sistema di controllo sociale gerarchizzato è stato mantenuto in vita dai Sukuma per quasi vent'anni. Di conseguenza, il Sungusungu si è sviluppato fino a diventare una struttura di gran lunga più avanzata di una squadra di vigilanza.

Il successo del Sungusungu, e la rapidità con cui si è affermato, solleva vari interrogativi di interesse antropologico. Per esempio, come fa un gruppo di persone a creare un sistema di giustizia a livello nazionale in meno di un anno? In un paese in cui convivono oltre 100 gruppi etnici diversi, come mai il Sungusungu si è affermato solo tra i Sukuma?

Una risposta a questi interrogativi viene dalla teoria dell'evoluzione culturale, una nuova variante della biologia evolutiva, che oltre a fornire una spiegazione del successo del Sungusungu tra i Sukuma offre anche intuizioni più profonde circa l'evoluzione della cooperazione e il modo in cui i gruppi etnici si formano e si conservano nel tempo.

L'inizio del Sungusungu

In origine, i Sukuma abitavano nella parte settentrionale della Tanzania. Coltivano prevalentemente mais e riso, e allevano mandrie di bestiame che arrivano a migliaia di capi. Il loro gruppo etnico si distingue per varie caratteristiche specifiche. I Sukuma vestono spesso con abiti dalle fantasie sgargianti, che completano con vistosi gioielli e copricapi neri. Inoltre, le varie comunità di questi agricoltori-pastori hanno sempre interagito intensamente, attraverso organizzazioni tra villaggi vicini, società di danza e altre strutture sociali la cui portata si estende al di là dei confini del villaggio, della famiglia e perfino delle differenze di rango. Ma ciò per cui sono soprattutto noti i Sukuma è la loro incredibile generosità: le madri del gruppo obbligano i propri bambini a condividere il cibo con gli altri.

Negli anni sessanta e settanta, i Sukuma iniziarono a migrare verso tutte le regioni della Tanzania, fino a raggiungere i villaggi a sud del Katavi National Park, nella regione di Rukwa, una zona di frontiera presso il lago Tanganica e il confine con lo Zambia. In quest'area, gli agricoltori-pastori Sukuma vivono nei dintorni dei villaggi del gruppo etnico autoctono, i Pimbwe. Questi ultimi sono piccoli agricoltori che integrano la dieta con pesce e selvaggina. Inoltre, le istituzioni sociali dei Pimbwe promuovono l'interazione sociale e la cooperazione solo all'interno dei singoli clan e villaggi.

Le famiglie sukuma godono di una reputazione di eccezionale ospitalità e generosità in tutta la Tanzania. Gli ospiti, siano essi appartenenti allo stesso gruppo etnico oppure ad altri gruppi, sono sempre accolti con abbondanti offerte di cibo. Al contrario, le famiglie pimbwe hanno un atteggiamento chiuso e sospettoso verso l'esterno, vivono e mangiano in gruppi familiari strettamente coesi e raramente aprono le loro case a persone che non appartengono alla loro famiglia o clan.

Furono i gruppi etnici Sukuma e Nyamwezi della Tanzania settentrionale, nel 1981, a dare inizio al Sungusungu. A causa degli stretti legami che ci sono tra queste due etnie, l'organizzazione fu spesso definita come «un'armata di antenati». A livello di villaggio, la struttura del Sungusungu prevede dei leader scelti attraverso regolari elezioni, un consiglio segreto e infine i membri dell'organizzazione. La posizione di massima autorità è quella del consiglio segreto, che raccoglie le accuse di trasgressioni, giudica la colpevolezza o l'innocenza e decide e infligge le punizioni. Al livello gerarchico immediatamente inferiore vi sono lo *ntemi* – il capo – e lo *mwenyekiti*, il presidente. Il capo si serve delle proprie conoscenze di stregoneria per proteggere i suoi soldati. Per esempio si pensa che sia in grado di trasformare i proiettili dei ladri in acqua. Il presidente, da parte sua, dirige gli incontri pubblici. La struttura del Sungusungu prevede poi molti altri ruoli, tra cui quello del *katibu* – o segretario – che tiene una documentazione delle riunioni, e naturalmente gli *askari* – soldati – che inseguono i ladri, trovano i testimoni e aiutano le persone in difficoltà.

Dopo aver creato le organizzazioni del Sungusungu nelle regioni settentrionali, i Sukuma inviarono capi in altre parti della Tanzania, tra cui la regione di Rukwa, per addestrare altri Sukuma al nuovo sistema. Gli abitanti dei villaggi sukuma vennero informati circa le regole e i ruoli del Sungusungu, e venne chiesto loro di prestare un giuramento di lealtà e di scegliere tra due opzioni: o unirsi al Sungusungu del villaggio partecipando attivamente alle sue iniziative, oppure ammettere i propri trascorsi criminali e ripagare il villaggio con capi di bestiame in modo da lavare il delitto, secondo le regole del Sungusungu. Nella regione di Rukwa, con poca polizia in circolazione e una grande frequenza di furti e litigi, la maggior parte dei Sukuma ha colto al volo i vantaggi del Sungusungu.

In sintesi/*Il successo di un gruppo*

- I Sukuma della Tanzania, noti per la loro ospitalità e attitudine alla cooperazione, nonché per i loro raduni festosi, sviluppano organizzazioni sociali che travalicano gli ambiti familiari, di clan, di villaggio e di ceto.
- Nel 1981, i membri di questa etnia hanno formato un'organizzazione di giustizia popolare particolarmente ben strutturata ed efficiente, il Sungusungu, che si è estesa in pochi anni in gran parte della Tanzania, evolvendosi fino a occuparsi di gestire qualsiasi tipo di conflitto: dagli adulteri ai contenziosi sulla proprietà.
- Gli autori dell'articolo, il cui lavoro sul campo si è svolto anche grazie a un «gioco dell'ultimatum» che esplorava le norme della cooperazione, mostrano in che modo la teoria dell'evoluzione culturale possa spiegare gran parte del successo del Sungusungu.

TRA GLI OLTRE CENTO GRUPPI ETNICI CHE CONVIVONO IN TANZANIA, i Sukuma si distinguono per specifiche caratteristiche, tra cui l'abitudine di indossare abiti dalle fantasie sgargianti. Ospitali e particolarmente versati per le interazioni sociali, i Sukuma sono però noti soprattutto per la loro eccezionale generosità. (Tranne dove è diversamente specificato, tutte le illustrazioni di questo articolo sono cortesia degli autori.)

Oggi la stragrande maggioranza dei Sukuma, se non la totalità, rivendica con entusiasmo la propria appartenenza all'organizzazione. La linea strategica generalmente adottata è che l'aumento dei componenti del Sungusungu riduca il numero dei potenziali delinquenti. Prova ne sia il fatto che, agli incontri del Sungusungu, spesso una parte dei membri esclama in coro (in lingua sukuma) «*Kwili basalama*», che significa: «che noi si possa moltiplicare». E un'altra parte risponde «*Jilinde*», «che io sia protetto».

Lavorando dall'interno

Uno degli autori di questo articolo, Brian Paciotti, ha compiuto un intenso lavoro sul campo nella regione di Rukwa, specialmente in due villaggi: Mirumba e Kibaoni. Ha iniziato con tre mesi di ricerca demografica, impegnandosi per conquistare la piena fiducia dei Sukuma e dei Pimbwe. Alla fine, il Sungusungu di Mirumba ha invitato Paciotti a entrare nell'organizzazione, con tanto di titolo di membro del consiglio.

Il suo status di *mzungu* («europeo», in swahili) non gli ha risparmiato alcun dovere. Ha fatto da arbitro in casi di furto, adulterio e crimini minori come debiti e calunnie. Lavorando dall'interno, Paciotti ha imparato che il Sungusungu è governato da un sofisticato sistema di regole sostanziali e procedurali. Inoltre ha osservato che la struttura gerarchica dei ruoli promuove l'obbedienza, proprio come accade in un esercito o in un'azienda. Il Sungusungu ha unità organizzative a molti livelli, da quello del villaggio a quello regionale.

Oltre ad associarlo come membro, il Sungusungu ha concesso a Paciotti di accedere al dettagliato archivio di casi giudiziari dell'organizzazione. Come la maggior parte dei tanzaniani, i Sukuma temono la corruzione. Per questo documentano tutte le loro attività e controllano costantemente che i propri membri si adeguino alle regole. I documenti mostrano che il Sungusungu riesce a far cooperare i villaggi anche su lunghe distanze. Per esempio, un furto di vacche viene riferito prima alla sede di un villaggio. Il segretario del Sungusungu locale invia quindi a tutti i villaggi vicini una nota scritta sulle vacche rubate, completa di disegno della marchiatura del bestiame sottratto. I villaggi inviano a loro volta lettere ad altri villaggi. Paciotti ha visto messaggi provenienti da villaggi distanti centinaia di chilometri, usati per catturare ladri di bestiame che avevano attraversato una vasta area.

In altri casi, il Sungusungu ostracizzava chi aveva trasgredito le regole vietando ai suoi membri di avere rapporti con loro. Per esempio, un Sukuma che gestiva un piccolo negozio di villaggio fu giudicato colpevole di adulterio. Egli tergiversò a pagare l'ammenda che gli era stata imposta, e violò ulteriormente le regole rivolgendosi alla polizia nella speranza di sottrarsi alla punizione. Il Sungusungu scrisse allora una lettera a tutte le sedi vicine diffidando qualsiasi membro dell'organizzazione a recarsi nel negozio dell'uomo. Poiché la maggior parte dei clienti erano Sukuma, e la maggior parte dei Sukuma sono membri del Sungusungu, il boicottaggio del negozio si rivelò molto efficace. Entro pochissimi giorni l'uomo pagò la multa, che ammontava a 30.000 scellini (la moneta della Tanzania), pari a circa 30 dollari. Come mostrano questi esempi, il Sungusungu è un sistema di giustizia che si basa su una cooperazione su vasta scala.

RELIGIONI TRADIZIONALI. Oltre al cristianesimo e all'islamismo, tra i Sukuma sono ancora molto diffuse le pratiche religiose tradizionali. Nell'immagine, un copricapo «da divinazione» usato nelle cerimonie sacre.

In realtà il Sungusungu divenne così vasto e potente che nel 1989 il Governo della Tanzania cercò di riportarlo sotto il proprio controllo. Anzitutto le autorità chiesero che i membri del Sungusungu usassero solo le loro armi tradizionali (e quindi non armi da fuoco), che smettessero di uccidere le persone sospettate di stregoneria e che cooperassero con la polizia locale. Quando i capi del Sungusungu accettarono queste limitazioni, il gruppo fu genericamente integrato nel sistema di giustizia formale.

Ma il Sungusungu continua a suscitare polemiche. La maggior parte delle critiche riguarda l'uso della violenza nelle punizioni. Per esempio, chiunque sia portato di fronte al consiglio segreto e rifiuti di confessare i crimini di cui è accusato viene dato in consegna ai soldati. Questi conducono spesso la persona sospettata a uno specchio d'acqua, la spogliano e ne ricoprono il capo con fango e paglia. L'indiziato del crimine, ancora ricoperto di fango e paglia, viene quindi immerso nell'acqua, ovvero «lavato» della colpa commessa.

Il fango, la paglia e le immersioni, però, non bastano ad assolvere il sospetto. Per essere riammesso nella comunità, deve ancora confessare il crimine e dire quanto è disposto a pagare come sanzione, e poi tutte le parti in causa devono concordare sulla cifra proposta. Ma non si tratta di una tranquilla discussione d'affari: nel frattempo, i giovani affiliati del Sungusungu picchiano duramente l'indiziato.

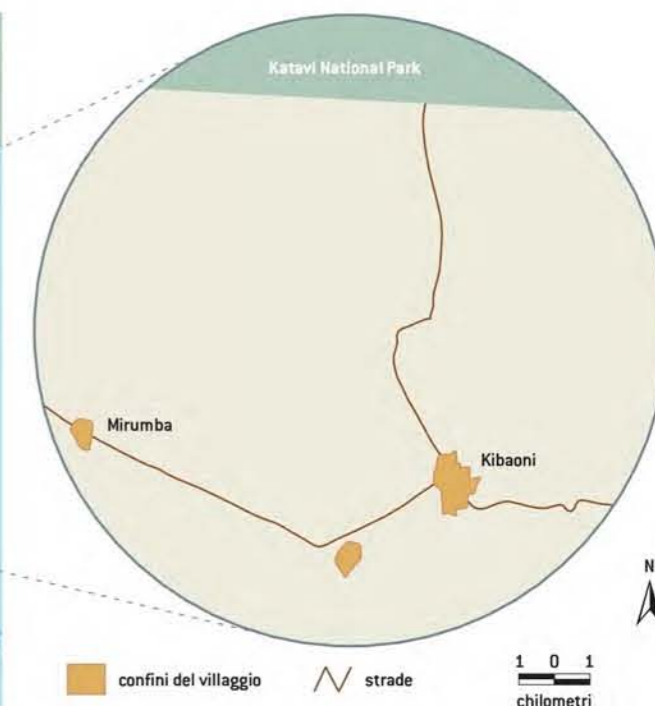
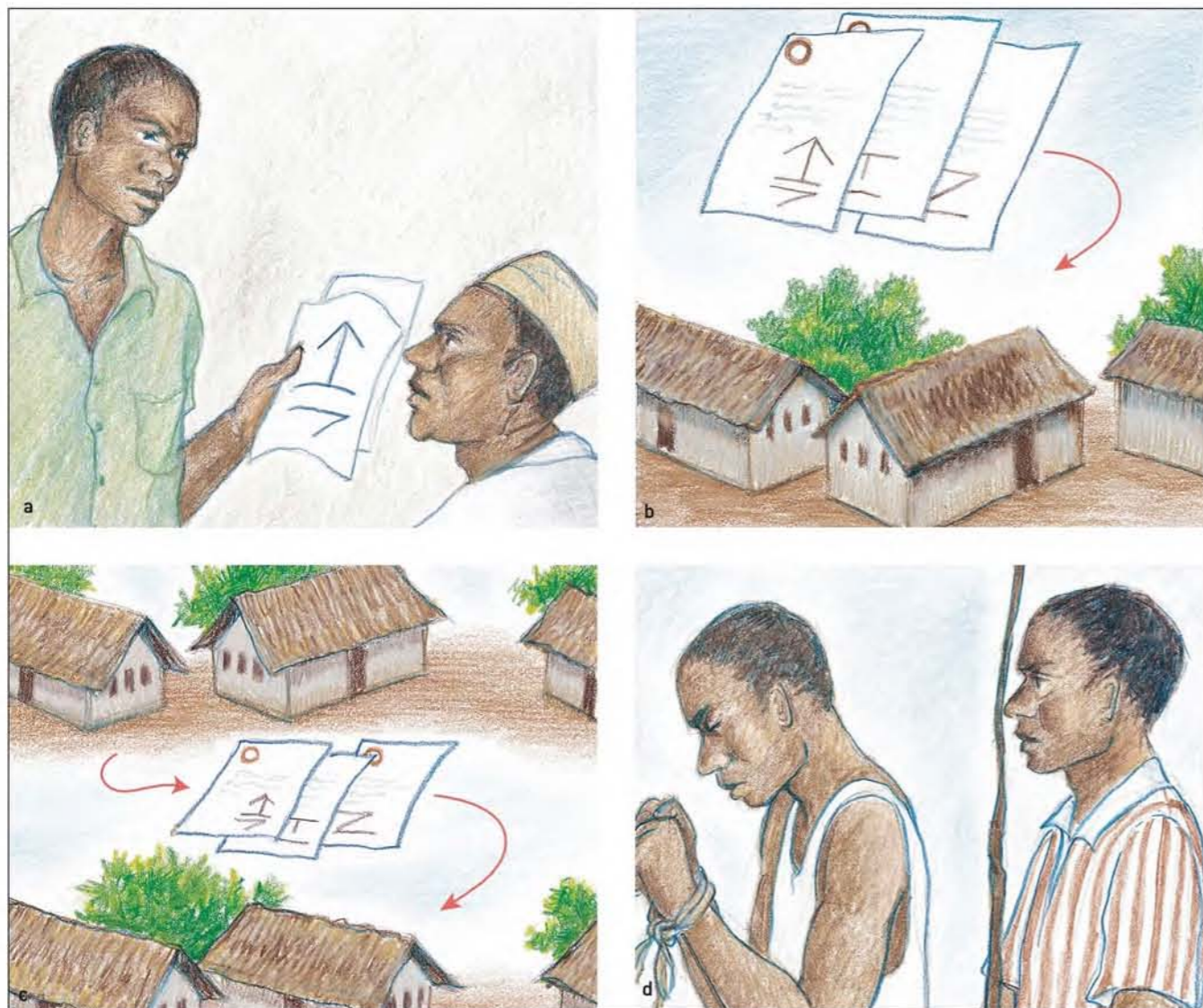
Molti casi si concludono anche peggio. In un caso, un consiglio segreto accusò – falsamente, come fu poi appurato – un uomo di etnia Fipa di avere rubato del bestiame. L'uomo non aveva nulla da confessare, ma fu percosso a morte. Un'altra volta, alcuni ladri di un villaggio distante avevano bruciato una casa: i soldati del Sungusungu, rintracciati i colpevoli, li uccisero.

I SUKUMA E I PIMBWE VIVONO VICINI NELLA REGIONE DI RUKWA, nella Tanzania sud-occidentale. Gli autori hanno lavorato in particolare con gruppi di due villaggi, Mirumba e Kibaoni.

Il gioco dell'ultimatum

Le organizzazioni del Sungusungu sono state create nel 1981, hanno raggiunto l'area dei Pimbwe nel 1982 e hanno ottenuto l'autorizzazione nazionale nel 1989: ma i Pimbwe esitavano a entrare a farne parte. Infine, nel 1997, i Pimbwe di Kibaoni diedero vita a un proprio Sungusungu, perché il bestiame dei Sukuma entrava nei loro campi e brucava i raccolti. Ma benché i Pimbwe avessero organizzato il loro Sungusungu seguendo il modello sukuma, il gruppo fallì quasi subito. In primo luogo, su 500 maschi adulti pimbwe, solo 40 si unirono al gruppo di Kibaoni. In secondo luogo, i capi della regione volevano solo un Sungusungu: quello dei Sukuma. Ci siamo chiesti se fosse possibile quantificare le differenze sociali che spiegavano perché i Sukuma avessero avuto successo nel creare un Sungusungu e i Pimbwe no.

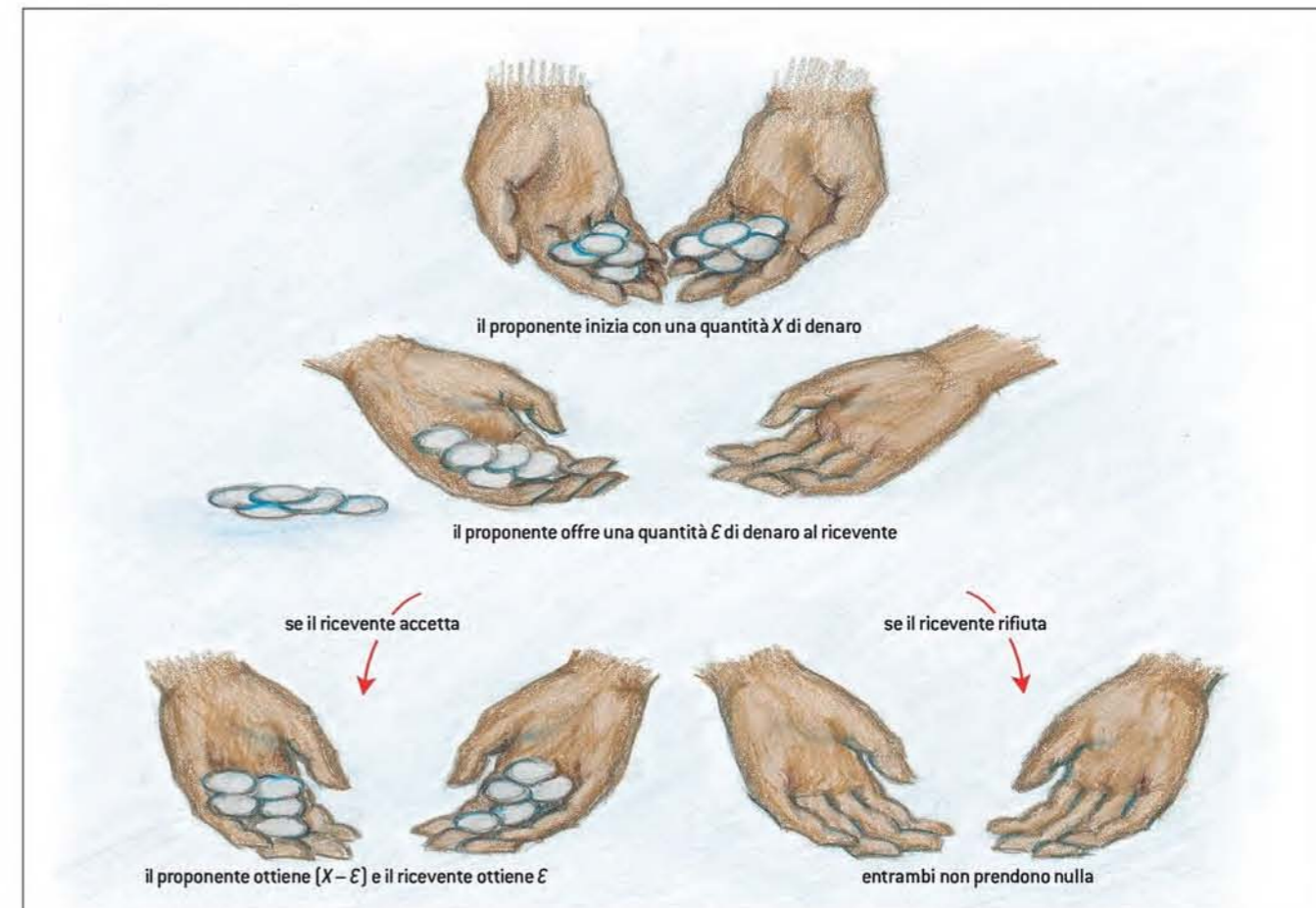
Per verificare le differenze di comportamento sociale tra i Sukuma e i Pimbwe, abbiamo utilizzato una tecnica sperimentale detta «gioco dell'ultimatum», sviluppata dagli economisti sulla base della teoria dei giochi. Questo gioco inizia con una quantità di denaro X, e coinvolge due giocatori anonimi: un proponente e un ricevente. Il proponente offre una parte di X designata come E. Il ricevente può accettare o rifiutare l'offerta. Se la accetta, allora il proponente tiene per sé una quantità di denaro pari a $(X - E)$, e il ricevente prende una quantità di denaro uguale a E. Ma se il ricevente rifiuta E, entrambi i giocatori rimangono senza nulla in tasca. Secondo le teorie sulla razionalità, il proponente dovrebbe offrire la più piccola somma di denaro che il ricevente sia disposto ad accettare, mentre questi dovrebbe prendere qualsiasi cosa. Le informazioni qualitative di cui disponevamo sulle culture sukuma e pimbwe ci spingevano però ad attenderci una differenza tra i due gruppi nel grado di condivisione.

Abbiamo studiato soggetti provenienti da due villaggi diversi.

METODI SPICCI. Nel Sungusungu le decisioni importanti sono prese da un consiglio segreto. Questo gruppo vaglia le accuse contro i presunti trasgressori e decide della loro innocenza o colpevolezza. Il consiglio segreto incarica anche i soldati del Sungusungu di dispensare le punizioni. Una punizione comune consiste nel ricoprire la testa del criminale con fango e paglia per poi immergerlo in acqua, così da lavare via il crimine. In alcuni casi, la punizione può consistere anche in un violento pestaggio.

CACCIA AL LADRO. Il Sungusungu è in grado di rintracciare i ladri di bestiame anche a grandi distanze. Per prima cosa, qualcuno denuncia il furto del bestiame al segretario del Sungusungu di villaggio (*a*). Il segretario scrive una nota che contiene il sigillo della sede locale, il disegno della marchiatura del bestiame rubato e poche righe che descrivono il furto. La nota viene poi trasmessa ai villaggi più vicini (*b*), i quali a loro volta inviano note ad altri villaggi (*c*). Con questa rete d'informazione, il Sungusungu è riuscito a catturare ladri (*d*) a molte centinaia di chilometri di distanza dal luogo in cui era avvenuto il furto.

Metà dei soggetti di ciascun gruppo etnico venivano abbinati a caso con un abitante del suo stesso villaggio e della stessa etnia, e l'altra metà con un abitante dell'altro villaggio, ma sempre della sua stessa etnia. La somma in gioco era di 1000 scellini tanzaniani, che equivaleva più o meno, all'epoca, al salario di una giornata di lavoro.

Nel gioco tra membri dello stesso villaggio, i Sukuma offrirono una media di 610 scellini, nel gioco inter-villaggio proposero 520 scellini. In altre parole, i Sukuma facevano offerte che andavano al di là dell'equo, proponendo più della metà del denaro. I proponenti pimbwe, invece, offrivano notevolmente di meno: 430 scellini in media nel test intra-villaggio e la miseria di 150 scellini nel test inter-villaggio. Le differenze individuali – età, sesso, ricchezza e così via – contavano relativamente poco, mentre l'appartenenza etnica spiegava gran parte della variabilità della quantità di denaro che un proponente offriva.

Trovandosi alle prese con un gioco nuovo e certamente bizzarro, i componenti dei due gruppi non si comportano allo stesso modo. Una lunga storia di istituzioni cooperative predispone i Sukuma ad agire in un modo altamente collaborativo e solidale. Come disse uno di loro: «È vergognoso comportarsi come una iena e prendere troppo». A quanto pare, i Pimbwe vedono le cose in modo molto diverso, decisamente più vicino a quello di un'economia di mercato.

I nostri risultati concordano con i recenti studi di Joseph Henrich e colleghi della Emory University. Questi ricercatori hanno usato una versione intra-villaggio del gioco dell'ultimatum in un campione di 16 società economicamente e geograficamente diverse. Come i Sukuma e i Pimbwe, gruppi culturalmente distinti partecipavano al gioco in modi molto diversi, e in quasi nessun caso le variabili a livello individuale condizionavano l'andamento del gioco. In Perù, i Machiguen-

Pimbwe		Sukuma	
offerta intra-villaggio	offerta inter-villaggio	offerta intra-villaggio	offerta inter-villaggio
430	150	610	520

X = 1000 scellini

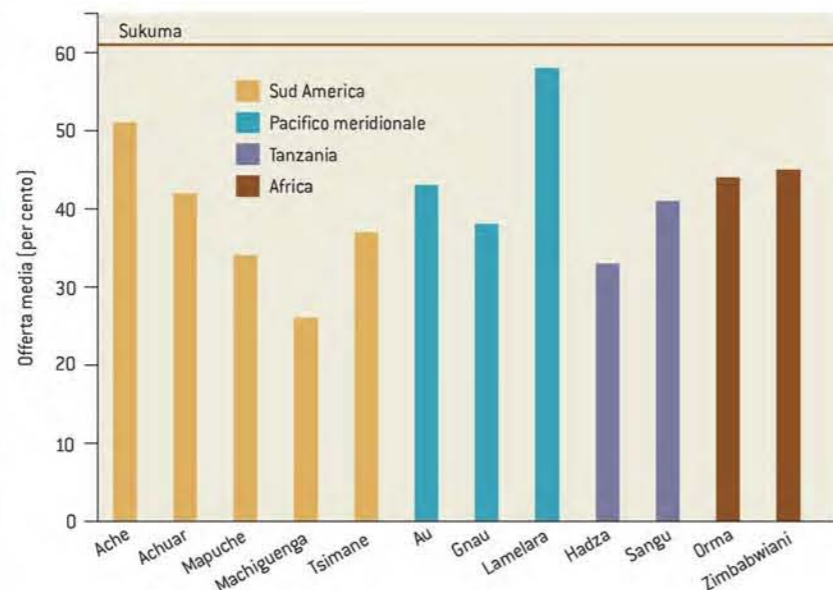
IL GIOCO DELL'ULTIMATUM. Nel test effettuato dagli autori di questo articolo, un proponente iniziava con la somma X, pari a 1000 scellini tanzaniani (*in alto*). Il proponente offre al ricevente una parte di X, definita $\mathcal{E}$ (*al centro*). Se questi accetta, allora il proponente tiene per sé una quantità di denaro uguale a $(X - \mathcal{E})$, e il ricevente prende una quantità pari a $\mathcal{E}$ (*in basso a sinistra*). Se invece rifiuta, restano entrambi a mani vuote (*in basso a destra*). I Pimbwe offrivano in media 430 scellini a riceventi del loro stesso villaggio e appena 150 a quelli di un villaggio diverso, mentre i Sukuma ne offrivano in media, rispettivamente 610 e 520.

ga offrivano solo il 26 per cento del denaro, il che fa apparire i Pimbwe straordinariamente generosi. Complessivamente, tuttavia, i Sukuma si sono classificati in assoluto come i giocatori più generosi.

Cultura e cooperazione

Anche se il Sungusungu ha avuto inizio poco più di una ventina di anni fa, forme simili di questa organizzazione erano apparse molto tempo prima. Agli inizi del Novecento, per esempio, gli etnografi erano rimasti colpiti dalle strutture istituzionali elaborate dai Sukuma, a livello di villaggio e anche a livelli superiori, per proteggere la proprietà, risolvere i conflitti e organizzare eventi politici. I sistemi economici di altre culture non richiedono necessariamente un analogo lavoro di squadra. Per esempio, l'economia di caccia dei Pimbwe funziona a livello locale e non richiede cooperazione su vasta scala. Di conseguenza tra i Pimbwe sono emerse poche istituzioni sociali destinate a governare le faccende dei singoli al di là dell'ambito del clan o del villaggio. Un altro gruppo etnico – i Kuria, della Tanzania settentrionale – ha tentato di creare un sistema analogo al Sungusungu; il tentativo è fallito perché l'organizzazione tendeva a privilegiare le tradizionali affiliazioni di clan anziché promuovere la collaborazione tra clan.

Dopo avere studiato una varietà di gruppi etnici e avere osservato in che modo partecipano al Sungusungu, riteniamo che la teoria dell'evoluzione culturale consenta di prevedere quali di essi avranno successo e quali no.

In primo luogo, l'apprendimento sociale di innovazioni complesse come le istituzioni è difficile. In molti casi, alcune regole saranno incompatibili con altre preesistenti. Di conseguenza, quando si tenta di mettere in atto rapide modifiche

RECORD DI GENEROSITÀ. Applicando il gioco dell'ultimatum a culture diverse emergono notevoli variazioni. Joseph Henrich, della Emory University, ha usato il gioco per studiare varie società di ogni parte del mondo. Partecipando al gioco dell'ultimatum assieme ad altri membri del loro stesso villaggio, nessuno degli individui di questi gruppi offriva tanto quanto i Sukuma (*linea marrone*), i quali proponevano in media oltre il 60 per cento del denaro. Gli appartenenti ad altre etnie della Tanzania offrivano ai riceventi solo il 40 per cento circa del denaro, ma alcuni gruppi anche meno. I Machiguenga del Perù, per esempio, offrivano in media solo il 26 per cento del denaro. Questi dati indicano che società differenti (con differenti regole culturali) interagiscono in modi molto diversi. La generosità tra i Sukuma potrebbe avere contribuito alla loro capacità di sviluppare il Sungusungu.

istituzionali alcuni gruppi sembrano incontrare maggiori difficoltà. Anziché creare qualcosa di completamente nuovo, di solito i gruppi tendono a modificare le loro istituzioni preesistenti, senza produrre mutamenti radicali.

A differenza di altri gruppi etnici in Tanzania, i Sukuma disponevano già di regole che favorivano la fiducia su vasta scala e avevano quindi la possibilità di inventare rapidamente un sistema di giustizia, quando ne fosse insorta la necessità. In secondo luogo, anche se le popolazioni umane comprendono una buona dose di mescolanze, l'appartenenza etnica spesso crea confini culturali che riducono la diffusione delle innovazioni da un gruppo all'altro.

Altri studi confermano le nostre conclusioni. Per esempio, Richard McElreath dell'Università della California a Davis, ha elaborato un modello di simulazione per capire in che modo alcuni indicatori dell'appartenenza etnica, per esempio l'abbigliamento, facilitino la cooperazione. Secondo le conclusioni dello studio, questi «marcatori etnici» consentono agli individui di interagire con altri che condividono norme sociali simili. I risultati del suo modello si basano sull'idea che ispirarsi al comportamento di una persona che appartiene a un altro ambiente possa essere svantaggioso sotto il profilo adattativo, mentre gli individui della nostra stessa etnia costituiscono esempi di comportamento migliori.

Il modello di McElreath prediceva che gli indicatori etnici dovessero essere più evidenti nelle regioni di confine, a causa della maggiore mescolanza tra gruppi di diverse etnie. E di fatto sospettiamo che le popolazioni sukuma migranti utilizzino marcatori etnici più specifici e appariscenti dei Sukuma dei territori d'origine.

L'espansione dei Sukuma

Come si è detto in precedenza, i moderni Sukuma tendono a stare in movimento. A partire dagli anni sessanta, in conseguenza del degrado ambientale dei loro tradizionali territori d'origine dovuto all'eccesso di sfruttamento dei pascoli, molti Sukuma iniziarono a condurre le proprie mandrie in regioni distanti. Oggi i Sukuma sono diffusi in tutta la Tanzania e costituiscono un esempio di gruppo etnico che si sta espandendo sia in numeri assoluti sia come distribuzione spaziale. Che cosa consente ai Sukuma di avere così successo e che cosa spiega la loro imponente espansione demografica?

Noi tendiamo a privilegiare una spiegazione culturale. Uno degli autori, Hadley, ha condotto un confronto intensivo tra Sukuma e Pimbwe per quanto riguarda la salute e la crescita dei bambini. I suoi dati quantitativi confermano un'affermazione che sentivamo fare a volte nel villaggio dei Sukuma: «I nostri figli non muoiono». Oltre a questo, come già è stato discusso, i Sukuma sviluppano istituzioni cooperative.

Il processo di selezione culturale di gruppo coinvolge la sostituzione di un gruppo da parte di altri – attraverso competizione diretta o indiretta – a causa di specifiche caratteristiche dei gruppi stessi. Di fatto, i Sukuma stanno competendo con successo con altri gruppi etnici. I Pimbwe soffrono di molti problemi sociali ed economici, e hanno meno successo dei Sukuma nell'assicurare il soddisfacimento dei propri bisogni quotidiani.

Noi riteniamo che la maggior parte dei Pimbwe riuscirà a sopravvivere. Tuttavia, osserviamo un buon numero di matrimoni tra Pimbwe e Sukuma, e nel corso dei prossimi decenni molti Pimbwe apprenderanno le tradizioni culturali sukuma. In definitiva, a causa delle istituzioni cooperative, dell'impegno nell'allevare i bambini e di altri tratti culturali, è probabile che elementi della cultura dei Sukuma stiano sostituendo gradualmente quella dei Pimbwe. In altre parole, l'evoluzione attraverso processi a livello di gruppo etnico.

Purtroppo, però, il successo complessivo non esclude il fallimento in alcuni settori specifici. Christopher Holmes ha concentrato la propria ricerca sulla salvaguardia dell'ambiente e su come le istituzioni e i processi di *decision-making* specifici di un'etnia influenzino l'uso delle risorse naturali. I risultati sono stati piuttosto spiacevoli. Per quanto i Sukuma abbiano molte regole istituzionali destinate a promuovere il Sungusungu e a proteggere il bestiame, mancano totalmente di regole per la promozione della conservazione ambientale. Abbiamo notizie sporadiche di casi in cui comunità sukuma e anche sedi locali del Sungusungu hanno messo a punto sistemi di tutela dell'ambiente, ma i Sukuma che vivono a ridosso del Katavi National Park non prevedono di rimanere nella stessa zona per lunghi periodi di tempo. Sapendo di spostarsi verso territori di pascolo sempre diversi, la maggior parte dei Sukuma non è quindi interessata alla conservazione delle risorse per il futuro, e si tiene alla larga dalle attività di un'organizzazione indigena di protezione ambientale creata nel villaggio di Kibaoni con il supporto del gruppo internazionale Cultural Survival.

I conflitti sorti tra gli immigranti Sukuma e le popolazioni indigene intorno alla gestione delle risorse naturali stanno stimolando iniziative a livello nazionale per la riconciliazione e la pianificazione dell'uso del territorio, iniziative che col tempo potrebbero contribuire a trasformare il Sungusungu e organizzazioni simili in un efficace sistema di gestione delle risorse. Alcuni episodi lasciano pensare che ciò possa avvenire. In un caso, per esempio, le autorità locali sono riuscite a convincere i Sukuma ad adottare comportamenti che erano nell'interesse della nazione, pur costando molto agli individui coinvolti. Nello specifico, un funzionario di villaggio doveva cercare di proteggere strade appena tracciate proibendo agli allevatori di bestiame di usarle per spostare le loro mandrie. Comprendendo l'importanza di avere buone strade, i capi del Sungusungu hanno accettato di negoziare, anche se il divieto obbligava i mandriani a muoversi tra sterpaglie infestate da serpenti micidiali come il mamba nero. D'altro canto, la cooperazione può produrre anche effetti molto spiacevoli. Alcuni gruppi Sungusungu nella parte settentrionale del paese vengono descritti come organizzazioni di stampo mafioso, poiché offrono protezione come bene imposto.

Come tutti i processi naturali, l'evoluzione culturale può condurre nel tempo a esiti diversi, e noi non sappiamo in che modo si evolverà l'istituzione del Sungusungu. Preferiamo, comunque, evidenziare le implicazioni positive della nostra teoria e ricerca: la maggior parte degli individui ha una predisposizione pro-sociale. Quando sono influenzate da istituzioni sociali su vasta scala che enfatizzano la cooperazione e la condivisione, le persone collaborano per il bene del gruppo. In Tanzania vi è una forte tradizione culturale che inibisce il conflitto etnico e promuove la pace tra gruppi sociali differenti. Perciò ci aspettiamo che grazie a istituzioni formate dal basso, come il Sungusungu, il benessere pubblico possa ricevere grandi spinte verso il progresso.

MA L'AMBIENTE NO. A causa delle abitudini migratorie dei Sukuma, la conservazione ambientale non è in cima alle preoccupazioni del Sungusungu, ma è possibile che in futuro questo genere di organizzazione possa essere trasformata in una forma cooperativa di gestione delle risorse.

GLI AUTORI

BRIAN PACIOTTI è professore e ricercatore all'Università della California a Davis, dove studia l'evoluzione delle istituzioni sociali. CRAIG HADLEY è associato al Population Studies and Training Center della Brown University. Si occupa di antropologia della nutrizione e approcci antropologici allo studio della salute delle popolazioni. CHRISTOPHER HOLMES è ricercatore associato all'Institute for the Conservation of Tropical Environments della State University of New York a Stony Brook, dove studia l'influenza dei processi decisionali umani sulla tutela dell'ambiente. MONIQUE BORGERHOFF MULDER insegna antropologia all'Università della California a Davis. I suoi interessi comprendono l'analisi evolutiva dei modelli demografici e familiari, lo studio della filogenesi culturale e le ricerche che integrano conservazione e sviluppo. Questo articolo è stato pubblicato sul numero di gennaio-febbraio di «American Scientist».

PER APPROFONDIRE

HENRICH J., *Cultural group selection, coevolutionary processes and large-scale cooperation*, in «Journal of Economic Behavior and Organization», vol. 53, pp. 3-35, 2003.

HOLMES C.M., *Cultural variation, decision-making, and local institutions: An examination of fuelwood use in Western Tanzania*, in «Society and Natural Resources», vol. 18, pp. 1-13, 2005.

PACIOTTI B. e BORGERHOFF MULDER M., *Sungusungu: The role of preexisting and evolving social institutions among Tanzanian vigilante organizations*, in «Human Organization», vol. 63, pp. 112-124, 2004.

PACIOTTI B. e HADLEY C., *The ultimatum game in southwestern Tanzania: Ethnic variation and institutional scope*, in «Current Anthropology», vol. 44, pp. 427-432, 2003.

Tutto un altro Google

Oggi una ricerca sul Web ci sommerge di risultati superflui. Ma è in arrivo una nuova generazione di motori di ricerca in grado di personalizzare i risultati

di Javed Mostafa
illustrazioni di Neil Brennan

In meno di un decennio, i motori di ricerca sul Web hanno rivoluzionato il modo in cui troviamo le informazioni che ci servono. Compulsare volumi su volumi, setacciando tutte le biblioteche disponibili, non è più necessario: pochi click del mouse bastano a trovare i documenti giusti. Ma ora che «andare su Google» è diventato sinonimo di «effettuare una ricerca», sono allo studio perfezionamenti che consentiranno ai motori di ricerca della prossima generazione di svolgere il loro compito in modo ancora più efficiente. I nuovi motori di ricerca migliorano la qualità dei risultati scavando più in profondità nel deposito dei materiali disponibili sul Web, classificando e presentando meglio ciò che scoprono e tenendo traccia nel tempo degli interessi dell'utente in modo da perfezionare la gestione delle sue nuove richieste di informazione. Ma in futuro i motori di ricerca espanderanno il loro campo d'azione, andando al di là della semplice elaborazione di quesiti presentati scrivendo un po' di parole in un riquadro di testo. In futuro, saranno in grado di stabilire automaticamente dove vi trovate e, per esempio, faranno in modo che mentre siete in viaggio il vostro palmare vi indichi il ristorante più vicino. Quando cercate una fotografia, i nuovi sistemi la troveranno più velocemente confrontando i vostri schizzi con immagini in cui compaiono linee e forme simili. E saranno persino capaci di dirvi il nome del motivetto che non ricordate bene, se solo gliene canticchierete qualche nota.

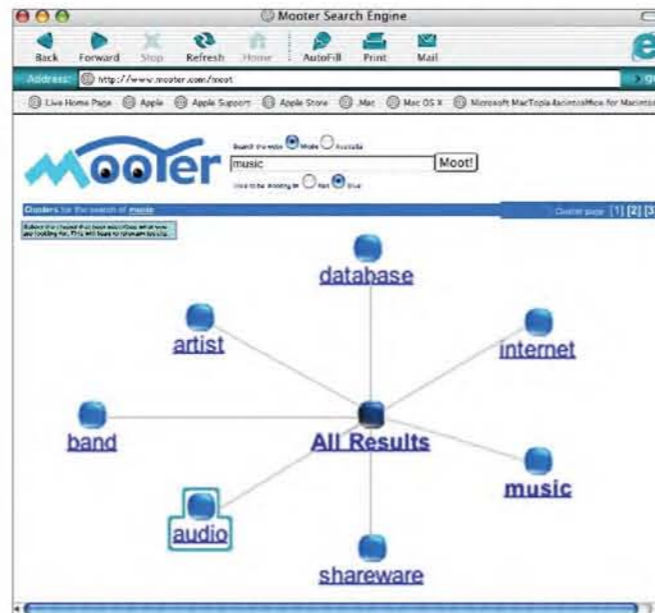
I motori di ricerca di oggi affondano le radici nel cosiddetto *information retrieval*, il recupero delle informazioni, un settore dell'informatica che risale agli anni cinquanta. In un articolo pubblicato da «Scientific American» nel 1966, *Information Storage and Retrieval*, Ben Emy Lipetz descriveva come le più sviluppate tecnologie informatiche del tempo potessero gestire solo operazioni di routine, concludendo che ci sarebbe stato un punto di svolta nel recupero delle informazioni quando i ricercatori fossero riusciti a capire meglio il modo in cui gli esseri umani elaborano le informazioni, per poi replicarlo sulle macchine. I computer non hanno ancora raggiunto quel livello di sviluppo, ma sono già in grado di tenere maggiormente conto degli interessi personali, delle abitudini e delle esigenze degli utenti.

Alberi di parole

Prima di parlare delle novità è opportuno ricordare come operano i motori di ricerca di oggi. Che cosa succede quando leggiamo sul monitor che Google ha setacciato miliardi di documenti in, mettiamo, 32 centesimi di secondo? In realtà, poiché verificare la presenza delle parole chiave della ricerca esaminando una pagina web alla volta richiederebbe troppo tempo, il sistema ha effettuato una serie di operazioni ben prima che l'utente abbia posto la sua domanda.

In primo luogo, i contenuti sono continuamente identificati e raccolti. Uno speciale codice software, un *crawler*, esplora le pagine pubblicate on line e le recupera assieme a quelle a cui sono collegate da un link, aggregandole in un'unica posizione. In un secondo passaggio, il sistema conta le parole rilevanti e ne stabilisce l'importanza in base a una serie di tecniche statistiche. Nella terza fase, viene generata a partire dai termini rilevanti una struttura dati, o albero, altamente efficiente, che associa quei termini a specifiche pagine web. Quando un utente avvia una ricerca, essa viene effettuata su quest'albero, detto anche indice, e non sulle singole pagine. La ricerca parte dalle radici dell'albero; a ogni passaggio, un ramo dell'albero (che rappresenta vari termini con le relative pagine web) può essere seguito oppure eliminato, riducendo in modo esponenziale i tempi della ricerca.

Per stabilire l'ordine di rilevanza dei documenti (o dei link) all'interno della lista elaborata, l'algoritmo di ricerca applica diverse strategie di classificazione. Un metodo comune considera la distribuzione e la frequenza delle parole, quindi genera pesi numerici per le parole che ne definiscono l'importanza all'interno di ogni documento. Le parole più frequenti (come «o», «per» o «con») o che appaiono in molti documenti ricevono un peso significativamente inferiore delle parole che hanno maggiore rilevanza semantica o che compaiono in un numero inferiore di documenti.

Le pagine possono essere caratterizzate anche con altri metodi. L'analisi dei link, per esempio, valuta ogni pagina in base alla sua associazione con altre pagine: in pratica, stabilisce se si tratta di una *authority* (dal numero di altre pagine puntate verso di essa) o di un *hub* (dal numero di pagine verso cui punta). Google si serve dell'analisi dei link per migliorare la classificazione dei propri risultati.

GRUPPI E PULSANTI. Il nuovo motore di ricerca Mooter semplifica l'accesso ai risultati catalogando le informazioni raccolte e raggruppando i relativi siti in sottogruppi che vengono rappresentati sullo schermo come pulsanti disposti intorno a un pulsante centrale, che rappresenta tutti i risultati. Cliccando sul pulsante di un gruppo apparirà una lista di link rilevanti e un nuovo elenco di gruppi associati.

Motori superiori

Nei sei anni che hanno segnato la sua ascesa al potere, Google ha presentato due vantaggi fondamentali rispetto ai concorrenti. Il primo è che può lavorare su una quantità estremamente ampia di pagine web. Il secondo è che i suoi metodi di indicizzazione e valutazione producono eccellenti risultati di classificazione. Recentemente, però, sono stati sviluppati nuovi motori dotati di capacità analoghe, e per certi versi superiori.

In sintesi/*La ricerca intelligente*

- I siti Web aumentano in modo esponenziale, e gli utenti hanno sempre più bisogno di motori di ricerca più precisi, in grado di recuperare le informazioni richieste con maggiore efficienza e rapidità.
- I motori di ricerca di nuova generazione miglioreranno i risultati scavando più in profondità nel materiale on line, perfezionando la classificazione e la presentazione delle pagine web, e tenendo conto degli interessi degli utenti per rispondere in modo più intelligente alle loro ricerche future. I nuovi software sapranno trovare la posizione dell'utente nello spazio, e saranno in grado di gestire, oltre ai testi, anche grafica e musica.
- Accordi commerciali di nuovo genere renderanno accessibili alle funzioni di ricerca intelligente tutti i materiali pubblicati in forma digitale – libri, musica e film – che oggi è impossibile consultare on line.

Gran parte dei contenuti digitali oggi rimane inaccessibile perché molti dei sistemi che li ospitano non conservano le pagine web nel modo in cui le vede l'utente. Queste risorse generano pagine web su richiesta solo quando gli utenti interagiscono con loro, ma un tipico crawler rimane bloccato e non riesce a recuperarne il contenuto. Questo nasconde agli utenti una straordinaria quantità di informazioni: secondo alcune stime, circa 500 volte più grande di quella del Web convenzionale. Attualmente, l'impegno è concentrato sul tentativo di rendere le ricerche su questo «Web nascosto» facili quanto nel resto della rete.

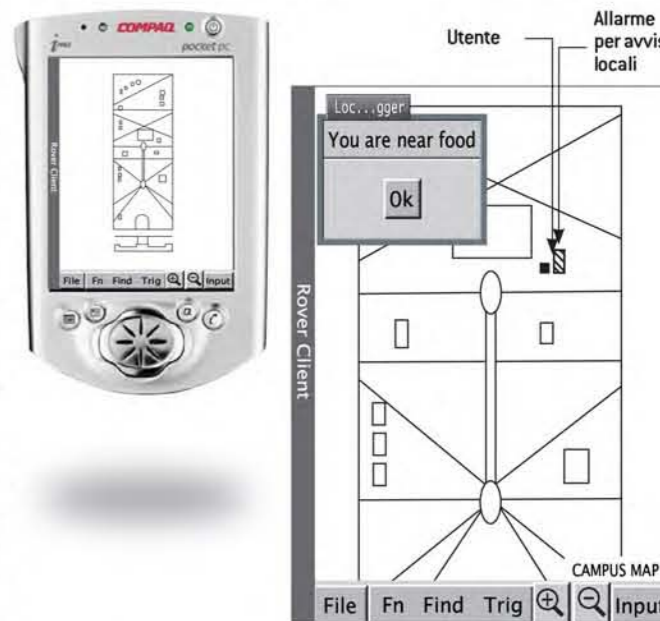
A questo scopo è stata sviluppata una classe di programmi chiamati *wrapper*, che sfruttano la tendenza a presentare le informazioni on line mediante strutture «grammaticali» standard. I *wrapper* lavorano in vari modi. Alcuni ottengono l'accesso ai contenuti nascosti sfruttando la sintassi tradizionale delle ricerche e i formati standard delle risorse on line. Altri sfruttano le interfacce delle applicazioni di programmazione, che consentono al software di interagire attraverso un set standard di operazioni e comandi. Un esempio di programma che permette di accedere al Web nascosto è Deep Query Manager, della Bright Planet. Basato su wrapper, può far arrivare portali e interfacce di ricerca personalizzati a più di 700.00 risorse on line nascoste.

Basarsi solo su parole o link per stabilire una graduatoria, senza porre alcun limite al tipo di pagine da confrontare, permette però di ingannare il sistema di classificazione e deviarne la ricerca. Per esempio, digitando *miserable failure* («miserabile fallimento») sui tre maggiori motori di ricerca – Google, Yahoo e MSN – il primo link della lista è quello verso il sito della Casa Bianca.

La quantità di informazioni contenute nel «Web nascosto» sarebbe 500 volte maggiore di quella accessibile

Invece di fornire all'utente una lista di risultati classificati (che può essere facilmente manipolata), alcuni motori di ricerca cercano di individuare uno schema comune tra le pagine che più si avvicinano alla ricerca, raccogliendo i risultati in gruppi più piccoli (*cluster*). Gli schemi possono includere parole comuni, sinonimi, parole associate o anche temi concettuali più complessi, identificati attraverso regole speciali. Questi sistemi etichettano ogni cluster con il termine rilevante, e l'utente può perfezionare ulteriormente la propria ricerca selezionandone uno in particolare. Tra i motori di ricerca che usano questo metodo vi sono Northern Light, che ne è stato il pioniere, e Clusty.

Mooter, un motore di ricerca innovativo che usa anche tecniche di *clustering*, fornisce diversi vantaggi ulteriori presentando visivamente i cluster (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). I «pulsanti» delle sottocategorie sono disposti come i raggi di una ruota intorno a un pulsante centrale che rappresenta tutti i risultati. Cliccando sul pulsante di un cluster apparirà una lista di link rilevanti e un nuovo elenco di gruppi associati. Mooter ricorda i gruppi scelti; selezionando l'opzione *refine* (perfeziona), che combina i risultati della ricerca in corso con quelli di ricerche precedenti, l'utente può ottenere risultati più precisi.

Un altro motore di ricerca che usa la visualizzazione è Kartoo. Si tratta di un cosiddetto motore «di metaricerca», che sottopone

SO DOVE SIAMO. Un sistema informatico che conosce la propria posizione, come la tecnologia Rover dell'Università del Maryland, permette a un dispositivo portatile wireless di conoscere costantemente la propria posizione sulla mappa. In questo modo, Rover è in grado di fornire all'utente in movimento informazioni su ciò che lo circonda.

la richiesta dell'utente ad altri motori e fornisce i risultati in forma visiva. Insieme a un elenco di termini chiave associati a vari siti, Kartoo mostra una «mappa» dove i siti più importanti sono rappresentati da icone e le relazioni tra di loro da percorsi segnati con un'etichetta, ciascuna delle quali può essere usata per perfezionare la ricerca.

Un altro modo in cui gli strumenti informatici semplificheranno le ricerche sarà guardando nel vostro hard disk, oltre che nel Web, mentre oggi la ricerca di un file sul computer di un utente richiede un software separato. Google, per esempio, ha annunciato l'uscita di Desktop Search, che combina le due funzioni, consentendo all'utente di specificare se una data ricerca debba avvenire su uno specifico hard disk, sul Web, o su entrambi. Anche Longhorn, il prossimo sistema operativo della Microsoft, dovrebbe avere capacità simili. Utilizzando tecniche sviluppate per un altro progetto Microsoft, chiamato Stuff I've Seen, Longhorn potrebbe presentare capacità di «ricerca implicita», in grado di rintracciare informazioni rilevanti senza che l'utente debba specificare una richiesta. La ricerca implicita raccoglie parole chiave dalle informazioni testuali recentemente manipolate dall'utente, come le e-mail o i documenti Word, per localizzare e presentare contenuti affini nei file conservati nel suo hard disk. Microsoft potrebbe estendere la funzione di ricerca ai contenuti del Web, consentendo agli utenti di trasformare in chiave di ricerca qualsiasi contenuto testuale presente sullo schermo.

Amazon, Ask Jeeves e Google hanno annunciato iniziative per consentire agli utenti di **personalizzare le loro ricerche**

Trovami, se ci riesci

Di recente, Amazon, Ask Jeeves e Google hanno annunciato iniziative che cercano di migliorare i risultati delle ricerche permettendo agli utenti di personalizzarle. Il motore di ricerca di Amazon, A9.com, e quello di Ask Jeeves, MyJeeves.ask.com, possono registrare sia le richieste sia i risultati, consentendo agli utenti di salvarle in modo permanente come «segnalibro». In MyJeeves, le ricerche salvate possono essere riviste e poi rilanciate, fornendo così la possibilità di creare un sottogruppo web personalizzato. Anche Amazon A9 ha funzioni simili; in più, usa le registrazioni delle precedenti ricerche effettuate dall'utente per suggerire altre pagine. Questa funzione di assistenza ricorda il servizio dei «libri raccomandati per te» di Amazon, che si basa sull'andamento delle ricerche e degli acquisti di comunità di utenti: un processo chiamato anche «filtraggio collaborativo».

Sia in A9 che in MyJeeves, la storia delle ricerche di un utente non è conservata sulla sua macchina, ma nel server del motore di ricerca, in modo che, oltre a essere al sicuro, l'utente possa usarla per le sue nuove richieste a prescindere dal computer che sta usando.

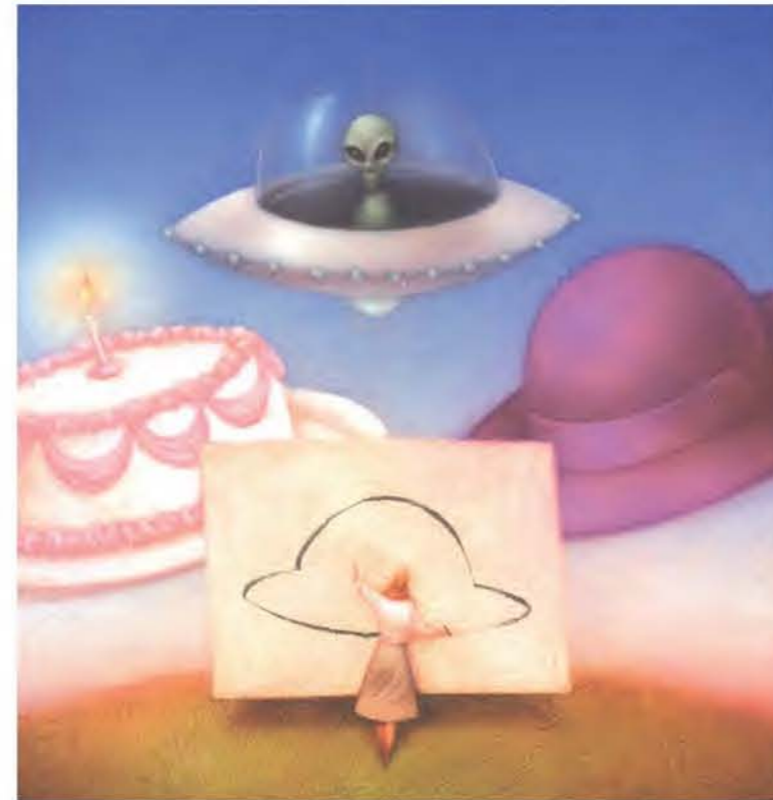
Nella versione personalizzata di Google, gli utenti possono specificare gli argomenti di interesse scegliendoli in un elenco gerarchico preconfezionato. E possono anche specificare il grado del loro interesse nei vari argomenti o settori. Il sistema userà poi gli argomenti prescelti, il livello di interesse indicato e la richiesta iniziale per recuperare e classificare i risultati.

A dispetto della loro importanza, però, questi nuovi strumenti rappresentano solo miglioramenti incrementali. Se i motori di ricerca riuscissero a prendere in considerazione il contesto complessivo di una ricerca personale, e cioè i soggetti cercati di recente, il comportamento individuale, gli argomenti di lavoro e così via, la loro utilità aumenterebbe enormemente.

Ma per riuscire a determinare il contesto di un utente bisognerà superare difficoltà progettuali enormi. In primo luogo, si dovranno costruire sistemi che controllino automaticamente interessi e abitudini degli utenti, in modo che i motori di ricerca possano dedurre il contesto in cui un soggetto sta effettuando una ricerca, la piattaforma informatica che usa e la sua familiarità con il computer e il Web. Conoscendo questi dati a priori, e conservandoli in quello che viene definito il «profilo utente», il software potrebbe allora fornire un'informazione adeguatamente personalizzata. Ma acquisire e conservare informazioni accurate sugli utenti può rivelarsi difficile. In fondo, la maggior parte delle persone difficilmente si prenderà la briga di inserire altri dati oltre a quelli richiesti per le normali attività di ricerca.

Una buona fonte d'informazione sugli interessi personali sono le registrazioni del modo in cui un utente naviga sul Web e interagisce con le applicazioni più comuni del suo computer. Mentre una persona apre, legge, gioca, guarda, stampa o condivide documenti, i motori potrebbero registrare queste attività e usarle per guidare le ricerche di soggetti particolari. Questo processo assomiglia alla ricerca implicita sviluppata da Microsoft. Power Scout e Watson sono i primi sistemi in grado di integrare le ricerche con profili degli interessi personali degli utenti generati da fonti indirette. Power Scout è rimasto un sistema sperimentale non commercializzato, ma Watson sembra essere prossimo al lancio sul mercato. Ora i programmatori stanno sviluppando software più sofisticati che registreranno informazioni sulle interazioni nel tempo e poi produrranno e conserveranno un profilo dell'utente per predirne gli interessi futuri.

Le tecniche basate sul profilo utente, però, non sono ancora state adottate su larga scala, probabilmente per diverse ragioni. In primo luogo, i problemi associati alla gestione di un profilo accurato nell'ambito di diverse attività e per un lungo periodo di tempo. Per creare un profilo efficace sono necessarie ripetute valutazioni, e l'attenzione di un utente può spostarsi in modi imprevedibili e sottili, tanto da intaccare drammaticamente i risultati di una ricerca. Un altro fattore è la tutela della privacy. La documentazione della navigazione on line, le ricerche salvate e gli stili di interazione con le applicazioni possono rivelare un numero significativo di informazioni personali riservate (fino al punto di rivelare l'identità dell'utente).

Oggi ci sono software che permettono agli utenti di cercare informazioni sul Web in maniera anonima. I principali strumenti usati da questi sistemi sono server «di intermediazione», attraverso i quali le operazioni di un utente sono trasmesse ed elaborate in modo che il sito che contiene i dati o il servizio conosce solo quei server e non è in grado di risalire fino all'utente che ha presentato la richiesta. Un esempio di questa tecnologia è il sito www.anonymizer.com, che consente di navigare on line in incognito. Un altro esempio è il software Freedom WebSecure, che si serve di più di un livello di intermediazione e codifica. Ma anche se questi strumenti offrono una ragionevole sicurezza, non esistono ancora servizi di ricerca in grado di conciliare la personalizzazione con una solida tutela della privacy.

TROVA LA FORMA. 3-D Model Search Engine, sviluppato dal Princeton Shape Retrieval and Analysis Group, confronta la forma desiderata con una serie di immagini di forma simile presenti in rete, consentendo di localizzare oggetti tridimensionali molto più velocemente.

Sulla strada

Altri sistemi di ricerca legati al contesto prenderanno in considerazione il luogo in cui si trova una persona. Se, per esempio, un turista ha con sé un palmare in grado di decifrare i segnali del Global Positioning System (GPS) o di usare frequenze radio per stabilire e aggiornare i dati sulla sua posizione, i sistemi di ricerca potrebbero avere applicazioni importanti. Un esempio di questa tecnologia è in fase di sviluppo all'Università del Maryland. Il sistema, chiamato Rover, fornisce servizi testuali, audio e video nell'ambito di un'ampia area geografica. Rover può fornire una mappa dell'area dove si trova l'utente in cui sono segnalati vari luoghi di interesse, che riesce a identificare automaticamente applicando alla mappa una serie di «filtri» legati a soggetti specifici.

Il sistema può dare anche altre informazioni. Se stiamo visitando un museo, il palmare potrebbe mostrarci la mappa del piano in cui si troviamo e le opere più vicine. Quando usciamo dal museo, lo schermo del palmare cambierà di conseguenza, mostrandoci la mappa del quartiere e altri possibili punti di interesse.

Un sistema come Rover permetterebbe di inserire direttamente la propria posizione, recuperando informazioni personalizzate. Nel 2003 il gruppo responsabile della creazione di Rover e l'azienda privata Koolspan hanno ottenuto dei fondi dallo Stato del Maryland per sviluppare congiuntamente applicazioni per la distribuzione sicura di dati in forma wireless e l'autenticazione degli utenti. Da questa collaborazione dovrebbe emergere una versione più sicura e commercialmente più accettabile di Rover.

Sfortunatamente, l'errore di posizione dei sistemi che si basano sul GPS è ancora grossolano (3-4 metri). E anche se questa risoluzione può essere migliorata con sensori indoor e segnalatori esterni, i costi di sviluppo di queste tecnologie sono ancora relativamente alti. Inoltre, la diffusione di informazioni non testuali, specialmente immagini, audio e video, richiederebbe capacità di banda più elevate di quelle attualmente fornite dai palmari o dalle reti di trasmissione wireless. Il protocollo IEEE 802.11b, che offre un'ampiezza di banda fino a 11 megabyte al secondo, è stato sperimentato con successo nella distribuzione di servizi di ricerca *location-aware*, ma non è ancora disponibile su larga scala.

Caccia all'immagine

Contesto può voler dire qualcosa di più che gli interessi o la posizione dell'utente. I motori di ricerca stanno andando oltre le ricerche testuali, per lanciarsi a caccia di materiale grafico. Sul Web sono disponibili moltissime immagini tridimensionali, ma artisti, illustratori e designer non possono effettuare una ricerca di immagini o forme attraverso la tastiera.

3D Model Search Engine, un motore di ricerca sviluppato dal Princeton Shape Retrieval and Analysis Group, applica tre metodi per effettuare queste ricerche (*si veda l'illustrazione in alto*). Il primo sfrutta un sistema grafico interattivo chiamato Teddy,

I sistemi di ricerca ci assisteranno mentre **guidiamo, ascoltiamo musica o progettiamo un prodotto**

COME METTERE TUTTI IN RETE

Anche se Internet contiene ormai una straordinaria quantità di informazioni, molto di ciò che viene pubblicato oggi – testi, musica e video – non è disponibile on line. I contenuti costano, e chi li produce intende esercitare il massimo del controllo su ciò che crea, per cui ne limita rigidamente l'accesso. Ma la situazione sta cambiando, man mano che aumenta la collaborazione tra chi produce i contenuti (aziende come Time-Warner, Sony, Hearst, Elviser e così via) e chi gestisce i motori di ricerca più affermati (in particolare i tre più grandi: Yahoo, Google e MSN). La sfida è creare rapporti d'affari da cui entrambi i contraenti traggano dei vantaggi.

Una volta raggiunti accordi contrattuali adeguati tra editori e società che gestiscono i motori di ricerca, far sì che i siti dei produttori di contenuti siano accessibili e indicizzabili sarebbe relativamente semplice.

Mettiamo il caso che un utente trovi su un motore di ricerca la citazione del prodotto di un determinato editore: il link potrebbe indirizzarlo verso un'apposita pagina di accesso, dove l'utente troverebbe varie offerte per ottenere il contenuto completo.

In alcuni progetti pilota, gli editori stanno consentendo l'indicizzazione dei loro prodotti grezzi. Su Amazon, per esempio, è stato creato un progetto sperimentale attraverso cui i clienti possono leggere il testo integrale dei libri. Google ha recentemente introdotto un servizio per editori e grandi biblioteche che fornisce l'indicizzazione dei libri in modo che gli indici possano poi essere usati come contenuti Web.

Problemi analoghi si incontrano con i prodotti audio e video. Le case discografiche e gli studi cinematografici sono riluttanti ad adottare nuovi metodi di distribuzione. Anche in questo settore, però, stanno nascendo modelli alternativi di commercializzazione. La Apple ha promosso con aggressività il suo iTunes Music Store, e sia Dell sia Hewlett-Packard hanno annunciato servizi di distribuzione musicale.

Col tempo, secondo gli analisti, è probabile che i motori di ricerca diventino *hub* – porte d'ingresso verso qualunque tipo di contenuto – che elaboreranno e gestiranno indici e forniranno servizi di ricerca per classi diverse di contenuti: i cui produttori, nel frattempo, si concentreranno solo sugli aspetti creativi.

che consente di disegnare semplici forme bidimensionali, da cui il software produce una proiezione virtuale tridimensionale. Il secondo metodo consente di disegnare più sagome bidimensionali (approssimando diverse proiezioni di un'immagine); quindi il motore di ricerca confronta gli schizzi con 13 proiezioni già calcolate degli oggetti tridimensionali presenti nel suo database.

Il terzo modo per trovare un'immagine consiste nel caricare un file che contiene un modello tridimensionale. Il sistema, ancora in fase di sviluppo, accoppia le interrogazioni alle forme descrivendo anzitutto ogni forma nei termini di una serie di funzioni matematiche: funzioni armoniche per le immagini tridimensionali e funzioni trigonometriche per quelle bidimensionali. Quindi produce, a partire da ciascuna funzione, alcuni valori «impronta» che sono caratteristici di ogni forma associata, e che sono detti «firme sferiche» o «firme circolari». I vantaggi che derivano dall'uso di questi descrittori sono due: la ricerca avviene indipendentemente da come siano orientate le forme dell'originale e quelle della richiesta, e i descrittori possono essere calcolati e accoppiati rapidamente.

Qual è quella canzone?

Anche la musica è entrata a far parte del panorama dei motori di ricerca. Il problema chiave nella ricerca di un motivo musicale è come formulare nel modo migliore la richiesta di ricerca. Una soluzione può essere quella di usare la notazione musicale o comunque un metodo di ricerca basato sulla trascrizione della musica che permetta all'utente di descrivere il motivo utilizzando caratteri alfanumerici che rappresentino le note musicali.

Ma non per tutti è facile trascrivere in note la canzone che hanno in mente. Il sistema Meldex, progettato dal neozelandese Digital Library Project, risolve il problema offrendo un paio di alternative per trovare la musica (*si veda l'illustrazione a fronte*). In primo luogo, si può registrare una ricerca suonando le note della canzone su una tastiera virtuale. In alternativa, si può canticchiare il motivo nel microfono del computer. Infine, si può utilizzare il testo della canzone come chiave di ricerca o combinare una ricerca basata sul testo con una basata sul motivo.

Per far funzionare Meldex, i ricercatori neozelandesi hanno dovuto superare diversi ostacoli: convertire la ricerca musicale in una forma che potesse essere prontamente calcolata; immagazzinare nei computer e ricercare grandi quantità di musica; combinare le richieste con i dati musicali immagazzinati. Nel sistema, un processo definito «quantizzazione» identifica le note e imposta le ricerca. Poi Meldex controlla automaticamente le tonalità come funzioni del tempo analizzando la struttura delle onde sonore e mappandole come note digitali. Il sistema conserva sia le note sia i lavori completi in una banca dati di spartiti musicali. Poiché la ricerca potrebbe contenere errori, la stringa di confronto deve ammettere una certa quantità di «rumore».

Cercando il futuro

I servizi di ricerca del futuro non saranno limitati alle piattaforme informatiche convenzionali. Già ora alcuni di essi sono stati integrati in sistemi automobilistici di comunicazione mobile, ed è probabile che verranno installati anche su apparecchi destinati all'intrattenimento, come le consolle per videogiochi, i televisori o gli impianti stereo. In questo modo, le tecnologie di ricerca svolgeranno un ruolo di assistenza, spesso tramite servizi web intelligenti, nella guida di un veicolo, nell'ascolto della musica o nella progettazione di un prodotto.

Un altro importante cambiamento nella ricerca sul Web sarà legato ai nuovi accordi commerciali che faranno aumentare moltissimo la copertura on line della gigantesca quantità di materiale pubblicato, (inclusi testi, video e audio), che attualmente non è accessibile dal computer (*si veda il box a fronte*).

Paradossalmente, le tecnologie di ricerca della prossima generazione saranno allo stesso tempo più e meno visibili, mentre sono alle prese con compiti sempre più complicati. Il ruolo visibile sarà rappresentato da strumenti più potenti che sapranno associare funzioni di ricerca e di estrazione dei dati, sistemi specializzati che cercano tendenze o anomalie nei database senza conoscere esattamente il significato dei dati. Il ruolo invisibile coinvolgerà lo sviluppo di una miriade di operazioni di ricerca intelligenti destinate a offrire servizi di supporto ad applicazioni e piattaforme. I progressi nella raccolta dati e nelle tecnologie di interfaccia per gli utenti renderanno un singolo sistema in grado di fornire automaticamente una serie ininterrotta di sofisticati servizi di ricerca totalmente integrati con funzioni visive interattive.

Facendo leva sullo sviluppo nell'ambito dell'apprendimento delle macchine e nelle tecniche di classificazione che consentiranno una maggiore comprensione e categorizzazione dei contenuti del Web, i programmatori svilupperanno una serie di funzioni visive di estrazione delle informazioni che daranno una dimensione interattiva alle ricerche. Gli analisti si aspettano che diventi disponibile una varietà di funzioni di ricerca, ognuna impostata per individuare contenuti all'interno di domini o format specializzati, per esempio dati musicali o biologici.

Gli informatici progetteranno queste funzioni perché rispondano alle esigenze degli utenti in modo rapido e appropriato nonostante la spaventosa quantità di informazioni che si troveranno a gestire. Chi fa ricerche in rete navigherà attraverso voluminosi depositi di informazioni con interfacce arricchite visivamente, che si concentreranno sulla creazione di grandi schemi di informazione più che sul recupero di singoli documenti. E, alla fine, per gli utenti sarà sempre più difficile capire dove finisce la ricerca e inizia la comprensione.

COME SI CHIAMAVA QUEL MOTIVO? Con il sistema Meldex del New Zeland Digital Library Project basta canticchiare qualche nota di un motivetto che si ricorda vagamente o digitare alcune delle parole del testo, e il software identifica rapidamente la canzone o il brano a cui corrisponde.

L'AUTORE

JAVED MOSTAFA è professore associato di informatica e direttore del Laboratory of Applied Informatics Research all'Università dell'Indiana. Inoltre, è caporedattore della rivista specializzata *ACM Transaction on Information Systems* e dirige il laboratorio di ricerca informatica applicata a Indiana. I suoi interessi di ricerca si focalizzano sul miglioramento dell'interazione uomo-macchina.

PER APPROFONDIRE

LIPETZ BEN AMI, *Information Storage and Retrieval*, in «Scientific American», vol. 215, n. 3, p. 224-242, settembre 1966.

LIEBERMAN H., FRY C. e WEITZMAN L., *Exploring the Web with Reconnaissance Agents*, in «Communications of the ACM», vol. 44, n. 8, pp. 69-75, 2001.

FUNKHOUSER T. e altri, *A Search Engine for 3D Models*, in «ACM Transactions on Graphics», vol. 22, n. 1, p. 83-105, 2003.

MOSTAFA J., MUKHOPADHYAY S. e PALAKAL M., *Simulation Studies of Different Dimensions of Users' Interests and Their Impact on User Modeling and Information Filtering*, in «Information Retrieval», vol. 6, n. 2, pp. 199-223, 2003.

Per le URL dei siti citati, si veda www.sciam.com/ontheweb.